

# Entwicklung einer Referenzkörnung für die Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Christina Ott  
aus Gera

bei der  
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:  
20. Oktober 2008

Die Arbeit wurde durchgeführt am:

**Institut für Nichtmetallische Werkstoffe  
der Technischen Universität Clausthal**

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Hauptberichterstatte: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter

Berichterstatte: Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark

## ZUSAMMENFASSUNG

Obwohl die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) als weltweites Phänomen Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten ist, sind Bauwerksschäden, die unter Mitwirkung einer AKR entstehen, nach wie vor existent und häufen sich sogar in den letzten Jahren.

Neben der Verwendung natürlich alkalireaktiver Gesteinskörnungen kommen bei der Untersuchung der Reaktion im Labor Borosilikatglasscherben zum Einsatz, die aktuell üblicherweise in Testmischungen als alkalireaktives Vergleichsmaterial verarbeitet werden. Dies ist nicht immer unproblematisch, da das Material eine gewisse Überempfindlichkeit aufweist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher verschiedene künstliche Zuschläge hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität getestet. Ziel war dabei, eine Referenzkörnung mit definierter alkalireaktiver Sensibilität zu entwickeln, die bei Verwendung in testweise ausgeführten Betonrezepturen bei entsprechender Gefährdung zuverlässig eine AKR anzeigt, aber nicht zu falsch positiven Ergebnissen führt.

Als mögliche Referenzkörnung wurden Glasperlen aus Eigenherstellung, die aus Borosilikatglasmehl pelletiert und anschließend gesintert wurden, sowie Borosilikatglasgranulat, Quarzglasgranulat und Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung getestet. Als Ergebnis dieser Untersuchungen konnte für die Verwendung von Borosilikatglasgranulat dessen Überempfindlichkeit nachgewiesen werden. Quarzglasgranulat reagierte ebenfalls zu empfindlich, während sich die Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung als zu reaktionsträge erwiesen. Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung dagegen zeigten die gewünschte Alkalireaktivität, ohne dabei falsch positive Ergebnisse zu erzielen. Nach bisherigem Stand der Untersuchungen sind diese als Referenzmaterial zum Nachweis einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geeignet, speziell zur AKR-Bewertung von Betonrezepturen.



## DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Nichtmetallische Werkstoffe (INW) der TU Clausthal.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter für die sehr gute Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen, die wertvollen Anregungen und die Unterstützung dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark von der Bauhaus-Universität Weimar für das Interesse am Thema und die Begutachtung dieser Arbeit.

Unter der Leitung von Frau Dr.-Ing. Ulrike Ahlers wurden am INW erste Vorversuche zum Thema durchgeführt, die eine nützliche Basis dieser Arbeit darstellten. Dafür, für die guten Tipps und Anregungen und besonders für ihre freundschaftliche Unterstützung möchte ich ihr herzlich danken.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich außerdem den technischen Mitarbeitern des INW sowie „meinen“ HiWi's, die mich bei der praktischen Durchführung der Versuche tatkräftig unterstützt haben. Sie alle haben ein mehr oder weniger großes Stück zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die gute Zusammenarbeit, ihre Teilnahme am Thema, ihre praktische und ideelle Unterstützung sowie für die freundschaftliche „Betreuung“ außerhalb der Arbeitszeiten.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an Herrn Dipl.-Ing. Manfred Utnehmer, Leiter der Materialprüfanstalt Bau Hannover, Betriebsstelle Clausthal. Mit seiner steten Diskussionsbereitschaft und vor allem mit seinen aufmunternden Worten, wenn nach langer Versuchsdauer die Ergebnisse nicht den Erwartungen entsprachen, hat er es immer geschafft, mir die gute Laune und den Optimismus zu erhalten.

Herr Dr. Reiner Behrend von der Fa. Polytec Waldbronn, Außenstelle Berlin, hat mir die zerstörungsfreie Baustoffprüfung näher gebracht. Mit seiner Einführung in die Laser-Vibrometrie hat er die Basis für einen wesentlichen Untersuchungsteil dieser Arbeit geliefert. Für ihn als Physiker war das sicher nicht immer einfach. Für mich als Nicht-Physiker erst recht nicht. Für seine geduldigen Erklärungen, den mitunter nötigen Telefon-Support und sein stets offenes Ohr gebührt ihm ein besonders herzlicher Dank.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf, Universität Dortmund. Ohne ihn hätte ich mich nie auf die Doktorandenstelle am INW beworben.

Zu guter letzt geht ein lieber Dank an meine Familie, besonders meinen Mann Helge, der mir den Rücken frei hielt und an unseren Sohn Jarne, der mit verlässlichen Schlafphasen in seinen ersten vier Lebensmonaten maßgeblich dazu beigetragen hat, diese Arbeit fertig zu stellen.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND MOTIVATION .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN DER ALKALI-KIESELSÄURE-REAKTION .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Schadensbild .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Chemischer Ablauf.....	4
<b>2.2</b>	<b>Einflussparameter .....</b>	<b>7</b>
2.2.1	Einfluss der alkaliempfindlichen Zuschlagkörnung.....	7
2.2.1.1	Art der Zuschlagkörnung.....	7
2.2.1.2	Menge und Korngröße der Zuschlagkörnung.....	12
2.2.2	Einfluss der Art und Menge des Zementes.....	14
2.2.3	Einfluss des Wasser-Zement-Wertes.....	16
2.2.4	Einfluss von Betonzusatzstoffen .....	18
2.2.4.1	Latent-Hydraulische Zusatzstoffe.....	18
2.2.4.2	Puzzolanische Zusatzstoffe.....	19
2.2.5	Einfluss der Alkalizufuhr von außen .....	19
2.2.6	Einfluss der Art der Probekörper und deren Lagerung.....	20
<b>2.3</b>	<b>Prüfverfahren .....</b>	<b>23</b>
2.3.1	Prüfung der Gesteinskörnung .....	23
2.3.1.1	Schnellprüfverfahren .....	23
2.3.1.2	Betonprüfungen .....	24
2.3.1.3	Prüfschema nach Alkali-Richtlinie.....	25
2.3.2	Performance-Prüfung .....	26
2.3.3	Internationale Prüfverfahren.....	27
2.3.3.1	NBRI-Testmethode.....	27
2.3.3.2	ASTM-Prüfverfahren .....	27
2.3.3.3	RILEM-Prüfverfahren .....	28
<b>2.4</b>	<b>Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen auf die Praxis.....</b>	<b>29</b>
<b>2.5</b>	<b>Zusammenfassung und Zielstellung .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Systematik .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Auswahl und Charakterisierung der Ausgangsstoffe .....</b>	<b>33</b>
3.2.1	Zemente .....	33
3.2.2	Inerte Gesteinskörnung.....	34
3.2.3	EIII-Gesteinskörnung .....	34
3.2.4	Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung .....	34
3.2.4.1	Herstellung .....	34
3.2.4.2	Eigenschaften .....	36
3.2.4.3	Separierung dicht/porös.....	38
3.2.5	Borosilikatglasgranulat.....	40

3.2.6	Quarzglasgranulat.....	41
3.2.7	Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung.....	41
<b>3.3</b>	<b>Herstellung und Lagerung der Probekörper .....</b>	<b>44</b>
3.3.1	Probekörper für Mörtelschnelltest.....	44
3.3.2	Probekörper für Klimalagerung.....	45
<b>3.4</b>	<b>Untersuchungsmethoden .....</b>	<b>47</b>
3.4.1	Dehnungsmessungen .....	47
3.4.2	Druckfestigkeit .....	48
3.4.3	Dynamischer Elastizitätsmodul mittels Laser-Vibrometrie .....	48
3.4.3.1	Allgemeiner Aufbau Laser-Vibrometer.....	49
3.4.3.2	Physikalische Grundlagen .....	49
3.4.3.3	Berechnung von $E_{dyn}$ aus Resonanzfrequenz.....	52
3.4.3.4	Experimenteller Versuchsaufbau Laser-Vibrometer .....	53
3.4.3.5	Einstellungen und Datenausgabe Laser-Vibrometer .....	53
3.4.4	Licht- und Rasterelektronenmikroskop .....	54
<b>4</b>	<b>ERGEBNISDOKUMENTATION UND AUSWERTUNG .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>EIII-Gesteinskörnung .....</b>	<b>57</b>
4.1.1	Mörtelschnelltest .....	57
4.1.2	Performanceprüfung .....	57
<b>4.2</b>	<b>Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung.....</b>	<b>58</b>
4.2.1	Mörtelschnelltest .....	58
4.2.2	Performancetests.....	59
4.2.3	Korrelation des E-Moduls mit der Druckfestigkeit .....	70
<b>4.3</b>	<b>Borosilikatglasgranulat.....</b>	<b>73</b>
<b>4.4</b>	<b>Quarzglasgranulat.....</b>	<b>77</b>
<b>4.5</b>	<b>Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung.....</b>	<b>84</b>
4.5.1	Unbehandelt.....	84
4.5.2	Geätzt.....	90
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>Ergebnisse Quecksilberdruckporosimetrie.....</b>	<b>103</b>
<b>7.2</b>	<b>Resonanzfrequenzen zur Berechnung von <math>E_{dyn}</math>.....</b>	<b>106</b>
7.2.1	Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung .....	106
7.2.2	Borosilikatglasgranulat.....	115
7.2.3	Quarzglasgranulat.....	117
7.2.4	Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung.....	121



# 1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Erstmals in den 40er Jahren des vergangenen Jahrhunderts beobachtet und beschrieben ist die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ein weltweites Phänomen und Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten. Obwohl der Reaktionsmechanismus mittlerweile gut bekannt ist, es Normen und Richtlinien zur Vermeidung einer AKR gibt, sind Bauwerksschäden, die unter Mitwirkung einer AKR entstehen, nach wie vor existent und häufen sich sogar in den letzten Jahren.

Für das Entstehen einer AKR bedarf es einer reaktiven Gesteinskörnung bei gleichzeitig vorhandenen gelösten Alkalien, die aus dem Zement und aus möglicherweise im Beton verwendeten Zusatzstoffen selbst stammen können oder die von außen zugeführt werden. Der Empfehlung, den Alkaligehalt des Zementes zu senken, kann jedoch nicht immer Rechnung getragen werden, denn die rohstoffbedingte Alkalität des Zementklinkers ist ein Aspekt, der teilweise nur unter hohem Kostenaufwand reduziert werden kann. Ähnlich verhält es sich bei der Verwendung lokaler Gesteinskörnungen. Die besonders in norddeutschen Gebieten auftretenden alkaliempfindlichen Zuschläge können aus wirtschaftlichen Gründen nicht immer vermieden werden. Sind beide Bedingungen erfüllt, besteht also die Möglichkeit einer AKR.

Die Gefahr einer möglichen AKR wächst ebenfalls in den heutigen Zeiten der Globalisierung, wo nicht nur Zemente, sondern z. T. auch Gesteinskörnungen nach Deutschland importiert und verarbeitet werden, denn die vorhandenen Richtlinien decken nicht jeden planerischen Einzelfall ab. Auch der Einsatz moderner und besonders wirksamer Taumittel auf Alkaliacetat- und Alkaliformiat-Basis, wie sie speziell auf Flughäfen verwendet werden, birgt ein Gefährdungspotential.

Um Bauwerksschäden zu verhindern, besteht also weiterhin Forschungsbedarf; auch was die Entwicklung neuer Testverfahren angeht, die es erlauben, in relativ kurzer Zeit eine geplante Betonmischung hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials beurteilen zu können. Unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Zemente und Zusatzstoffe können so schon im Vorfeld praxisgerechte Betonrezepturen entworfen und geprüft werden, so dass z. B. trotz der Verwendung einer alkaliempfindlichen Gesteinskörnung keine schädigende AKR entstehen kann.

Die Verwendung von Borosilikatglasscherben, die aktuell üblicherweise in Testmischungen als alkalireaktives Vergleichsmaterial verarbeitet werden, ist nicht immer unproblematisch, da das Material eine gewisse Überempfindlichkeit aufweist. Es soll daher eine entsprechende Referenzkörnung entwickelt werden, die eine definierte alkalireaktive Sensibilität aufweist und bei Verwendung in testweise ausgeführten Betonrezepturen bei entsprechender Gefährdung zuverlässig eine AKR anzeigt, aber nicht zu falsch positiven Ergebnissen führt. Da sich die schädigenden Auswirkungen einer Alkali-

Kieselsäure-Reaktion bei normaler Bewitterung mitunter erst nach Jahren zeigen, soll es mit Hilfe der Referenzkörnung möglich sein, bei pessimaler Lagerung die Betonzusammensetzung schon nach 2 bis 3 Monaten hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials beurteilen zu können.

## 2 GRUNDLAGEN DER ALKALI-KIESELSÄURE-REAKTION

Werden im Beton alkaliempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt, kann es bei gleichzeitig vorhandenen Alkalien, die aus dem Zement selbst stammen und/oder von außen zugeführt werden können, und hoher Feuchtigkeit zu einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion kommen. Als Reaktionsprodukt entsteht ein gelförmiges Alkali-Silikat-Hydrat, welches unter Volumenzunahme zur Dehnung und damit einhergehend zur Rissbildung im Beton führen kann.

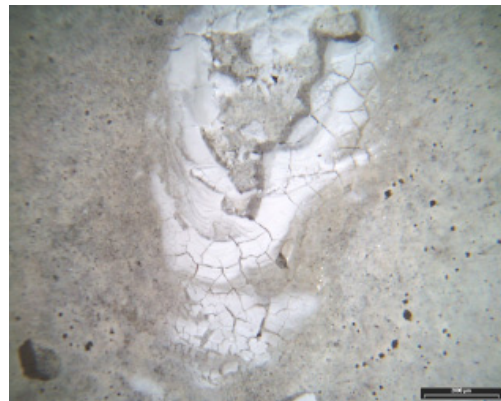
### 2.1 SCHADENSILD

Makroskopisch kann eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion anfangs unauffällig bleiben. Durch die treibende Wirkung des Alkali-Kieselsäure-Gels treten aber zunehmend Risse in der Zementsteinmatrix auf, die auch an der Betonoberfläche sichtbar werden. Das dabei entstehende netzartige Rissmuster kann allerdings auch in Zusammenhang mit anderen Betonschadensbildern wie Ettringitbildung und Frostangriff auftreten und ist daher kein eindeutiger Indikator für eine AKR.

Häufig ist die Rissbildung mit Gelaustritten verbunden. Das dickflüssige und zunächst farblose Alkali-Kieselsäure-Gel reagiert an Luft mit  $\text{CO}_2$  [Sie96] und trocknet weiß/grau und flächenhaft bis schollenartig auf [Fre98]. Es bilden sich dabei Alkalicarbonat und Kieselgel. Mit der Zeit wird durch Witterungseinflüsse das Alkalicarbonat ausgewaschen und es bleibt amorphes Kieselgel zurück [Sie96].



**Bild 2.1:** Typisches AKR-Rissmuster auf einer Betonoberfläche [Sta01]

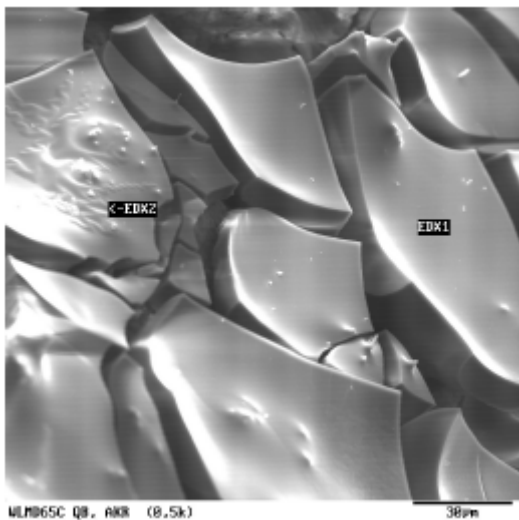


**Bild 2.2:** AKR-Gel auf Betonoberfläche [Dom03]

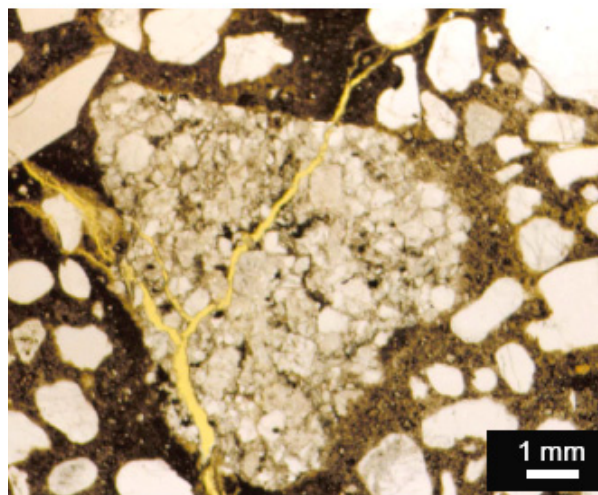
Liegen alkaliempfindliche Gesteinskörner direkt unter der Betonoberfläche, kann es auch zu sogenannten Popouts kommen. Dabei wird durch die treibende Wirkung des Alkali-Silikat-Gels das Korn aus der Matrix herausgehoben und der darüber befindliche Beton schollenartig abgesprengt [Loc75, Sie96]. Diese Abplatzungen gehen auch häufig

mit Gelaustreten einher. Das Absprengen größerer Betonschollen ist ebenfalls möglich, z.B. bei tiefer liegenden und größeren reaktionsfähigen Zuschlagkörnern [Bon73]. Für den Nichtfachmann sind diese Schäden aber auch leicht mit Abplatzungen über nicht frostbeständigen Zuschlagskörnern zu verwechseln.

Bei mikroskopischer Untersuchung einer AKR-geschädigten Betonprobe werden Reaktionsränder um die alkalireaktiven Gesteinskörner deutlich und die umliegenden Poren und Mikrorisse sind zumeist mit Alkali-Kieselsäure-Gel gefüllt. Das oft dichte Gel kann auch schollig zerbrochen sein und einen glasigen Porenrand aufweisen [Dom03]. Handelt es sich um eine langsam ablaufende bzw. schon abgeschlossene AKR, ist die Gelbildung eher kristallin und büschelartig [Tha90]. Der bei der Entstehung des Alkali-Kieselsäure-Gels auftretende Quelldruck übersteigt zumeist auch die Zugfestigkeit des Gesteinskorns, so dass dieses reißt und sich die Risse strahlenförmig in die Zementsteinmatrix fortsetzen [Sta01].



**Bild 2.3:** REM-Aufnahme: Glasiges Gel in Porenwandung, schollig zerbrochen [Dom03]



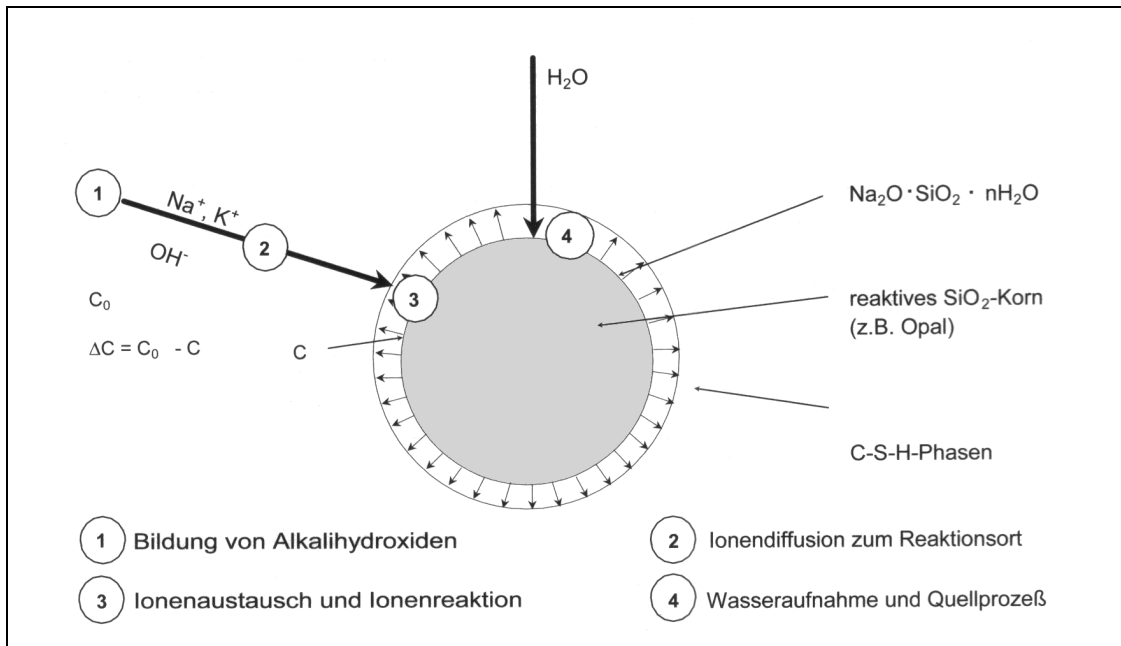
**Bild 2.4:** LiMi-Aufnahme: Infolge Gel-Bildung gerissenes Zuschlagkorn [Ött04]

### 2.1.1 CHEMISCHER ABLAUF

Der Reaktionsablauf der AKR (siehe auch Bild 2.5) ist wissenschaftlich gut untersucht und stellt sich nach [Sta01, Sta08, Wan91] wie folgt dar:

Bei der Hydratation der Zementklinkerphasen Alit und Belit zu Calcium-Silikat-Hydraten wird Calciumhydroxid frei, während gleichzeitig die gut wasserlöslichen sulfatisch gebundenen Alkalien Natrium und Kalium in Lösung gehen. Dabei entsteht schwer wasserlösliches Calciumsulfat und Alkalihydroxid:





**Bild 2.5:** Schematische Darstellung der chemischen Reaktion einer AKR [Sta01]

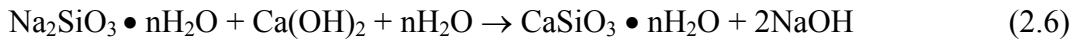
Das gut lösliche Alkalihydroxid führt zu einer stark steigenden Hydroxidionenkonzentration, die hohe pH-Werte von bis zu 13,9 bedingt. Nach [Loc75, Spr98] ist die hohe Alkalität der Porenlösung ein wesentlicher Einflussfaktor auf die folgenden Reaktionen.

Die frei werdenden  $\text{OH}^-$ -Ionen greifen das in der Zuschlagkörnung enthaltene reaktive Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) an. Bei reaktivem  $\text{SiO}_2$  handelt es sich um eine amorphe Zustandsform des  $\text{SiO}_2$ . Diese weist gegenüber der weitgehend ungestörten kristallinen Zustandsform (z.B. Quarz), welche aus regelmäßig angeordneten  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern aufgebaut ist, eine stark vergrößerte innere Oberfläche (durch ungeordnet verbundene  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder) auf. Außerdem sind die Si-O-Si-Ketten (Siloxane) durch den Einbau von Hydroxidgruppen, die in Form von Silanol-Gruppen ( $\text{SiOH}$  bzw.  $\text{Si}(\text{OH})_2$ ) vorliegen, gestört. Siloxane sind gegenüber den Silanolen die stabileren Verbindungen und gelten als Bausteine der Siliziumverbindungen. An die Silanolgruppen an der Oberfläche der Gesteinskörnung lagern sich Alkali- oder Calciumionen an, während die angreifenden  $\text{OH}^-$ -Ionen die Sauerstoffbrücken (Si-O-Si) im Inneren des Korns aufbrechen. Der Vernetzungsgrad innerhalb des Korns sinkt dabei. Die gleichzeitig eindringenden Alkaliionen lagern sich an die entstandenen  $\text{SiO}^-$ -Gruppen an. Da der Transport der Alkaliionen immer in einer Hydrathülle erfolgt, steigt der Wassergehalt innerhalb des Korns und es entsteht im Folgenden ein Alkali-Kieselsäure-Gel:



Die durch die Wasseraufnahme entstehenden Quelldrücke können die Zugfestigkeit des Betons übersteigen und so zur Rissbildung in der Zementsteinmatrix führen, die auch an der Betonoberfläche sichtbar werden. Außerdem kann das Alkali-Kieselsäure-Gel in

Gegenwart von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  weiter reagieren. Dabei entstehen CSH-Phasen und die bereits gebundenen Alkalien werden zum Teil wieder freigesetzt:



Bei Zufuhr von Feuchtigkeit können die so wieder mobilisierten Alkaliionen in tiefere Schichten des reaktiven Zuschlagkorns eindringen, um dort ebenfalls zu betonschädigendem Alkali-Kieselsäure-Gel zu reagieren.

Der Mechanismus, der zum Quellen des Gels führt, wird in der Literatur teils widersprüchlich diskutiert. Nach STARK [Sta01] nimmt das entstehende Alkali-Kieselsäure-Gel Wasser aus der Porenlösung auf und vergrößert so sein Volumen durch Quellen. Demnach soll sich das Gel wie eine semipermeable Wand verhalten, so dass  $\text{OH}^-$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  in Richtung des reaktiven Korns eindringen, während die Reaktionsprodukte nicht nach außen wandern können. Nach IDORN und TAYLOR [Ido97, Tay90] ist die Existenz einer semipermeablen Membran jedoch nicht eindeutig beweisbar.

Das entstehende Alkali-Gel füllt zunächst den umgebenden Porenraum aus und baut dann einen Quelldruck auf, der bis zu 11 N/mm<sup>2</sup> nach LOCHER [Loc01] bzw. lt. STARK [Sta01] sogar bis zu 20 N/mm<sup>2</sup> erreichen kann. Dies führt zunächst zur Volumenzunahme des Betons selbst. Wenn die Zugfestigkeit des Betons, die normalerweise bei 3 bis 6 N/mm<sup>2</sup> liegt, durch den Quelldruck jedoch überschritten wird, führt dies zur Rissbildung in der Zementsteinmatrix. Auch die Zugfestigkeit des Gesteinskorns kann durch den Quelldruck überschritten werden, welches dann ebenfalls reißt [Sta01].

Wesentlich für den Quellvorgang ist das Lösen der reaktiven Kieselsäure [Sch04]. Generell gilt, je höher der pH-Wert der Lösung, desto größer die Löslichkeit der Kieselsäure. Untersuchungen [Pik55, Nis89, Wie99] zeigen aber, dass sich die Art der Alkalien in der Porenlösung unterschiedlich auf die Löslichkeit der Kieselsäure auswirkt. So wird in NaOH-haltigen Lösungen die Kieselsäure schneller gelöst als in gleich stark konzentrierten KOH-haltigen Lösungen. Natriumhaltiges Alkali-Silikat-Gel scheint daher stärker quellfähig zu sein als kaliumhaltiges Gel [Hüb99, Sta01].

Nach STARK [Sta01] spielt aber auch der Calcium-Gehalt des Alkali-Silikat-Gels für dessen Quellfähigkeit eine Rolle. Durch Kontakt mit der Betonmatrix nimmt das Gel  $\text{Ca}^{2+}$  durch Ionenaustausch ( $2\text{Na}^+$  bzw.  $2\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$ ) auf, so dass aus  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \bullet n\text{H}_2\text{O}$  bzw.  $\text{K}_2\text{SiO}_3 \bullet n\text{H}_2\text{O}$  ein calciumreiches Gel (Calcium-Silikat-Hydrat, siehe Gleichung 2.5 und 2.6) entsteht [Wie89]. Je höher der Gehalt an Calcium im Gel, desto zähflüssiger wird es und desto geringer ist seine Quellfähigkeit [Sta01].

## 2.2 EINFLUSSPARAMETER

### 2.2.1 EINFLUSS DER ALKALIEMPFINDLICHEN ZUSCHLAGKÖRNUMG

#### 2.2.1.1 ART DER ZUSCHLAGKÖRNUMG

Der Ablauf einer AKR hängt in erster Linie vom Vorhandensein reaktiver Kieselsäure ab, die in unterschiedlichen Varietäten in der Zuschlagkörnung enthalten sein kann. Reaktives  $\text{SiO}_2$  liegt dann vor, wenn es amorph ist oder Störungen im Kristallgitterbau zeigt. Diese Varietäten weisen gegenüber der weitgehend ungestörten kristallinen Kieselsäure (z.B. Quarz) eine größere innere Oberfläche auf.

Der amorphe Zustand tritt zum einen bei unterkühlten Schmelzen (Gläser) auf. Die  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder sind nur ungeordnet miteinander verbunden und bilden nicht nur die normalen Sechser-, sondern auch Vierer-, Fünfer- und Siebener-Ringe aus. Zum anderen sind auch Opale amorph. Hier sind die Si-O-Si-Brücken bis zu 25 % durch den Einbau von Hydroxidgruppen gestört, welche in Form von Silanolgruppen ( $\text{SiOH}$  bzw.  $\text{Si}(\text{OH})_2$ ) vorliegen [Hof88]. OH-Gruppen schwächen das Netzwerk, da sie keine starke Bindung zu den anderen Teilen der Struktur eingehen [Sta01]. Auch Chalcedon und Flinte weisen diese Art der Störungen auf. Grundsätzlich findet immer eine Reaktion zwischen der im Beton vorliegenden Hydroxidlösung und der in der Zuschlagkörnung enthaltenen Kieselsäure statt, da es keine vollständig inerten Zuschläge gibt. Beton-schädigend wirkt sich diese Reaktion aber nur beim Vorhandensein reaktiver Kieselsäure und einem hohen Gehalt an Alkalien aus [Sta01].

In Tabelle 2.1 sind alkalireaktive Minerale aufgelistet:

**Tabelle 2.1:** Zusammenstellung alkalireaktiver Minerale nach STARK [Sta01]

Mineral	Struktur	Bemerkung
Opal	amorph oder kryptokristallin	<ul style="list-style-type: none"> <li>besonders reaktiv,</li> <li>kommt in Sandsteinen vor und ist eher schwer erkennbar</li> <li>enthält Cristoballit, der röntgenographisch nachweisbar ist und so auf den Opal-Gehalt schließen lässt</li> </ul>
Chalcedon	kryptokristallin	<ul style="list-style-type: none"> <li>ab Anteilen von 3% besteht AKR-Gefahr</li> <li>kommt vor in Hornstein, Flint oder Kieselkalk</li> <li>mittels LiMi gut erkennbar (langfaserige <math>\text{SiO}_2</math>-Kristalle), wird röntgenographisch als Quarz nachgewiesen</li> </ul>
Quarz	Mikro- oder kryptokristallin	<ul style="list-style-type: none"> <li>bei mikro- oder kryptokristalliner Ausbildung gilt er als alkalieempfindlich</li> </ul>
Stressquarz		<ul style="list-style-type: none"> <li>entstanden durch tektonische Belastung mit Drücken bis 1500 MPa</li> <li>kommt vor in reaktiven Gesteinen wie Grauwacke oder anderen metamorphen Gesteinen</li> <li>ist im LiMi unter gekreuzter Polarisierung anhand der s.g. undulösen Auslöschung zu erkennen</li> </ul>

Die aufgeführten Minerale sind Bestandteile verschiedener Gesteinsarten, die ihrerseits eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton hervorrufen können (Tabelle 2.2):

**Tabelle 2.2:** Zusammenstellung alkalireaktiver Gesteine nach STARK [Sta01]

Gesteinsart	Bemerkung
Opalsandstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>enthält Opal, Cristoballit</li> <li>kommt in Norddeutschland vor (eiszeitliche Genese)</li> <li>besteht aus Resten von Kieselorganismen und ist daher organischen Ursprungs</li> </ul>
Kieselkalk, Kieselkreide	<ul style="list-style-type: none"> <li>enthält Chalcedon, kryptokristallinen Quarz</li> <li>kommt vor im nordöstlichen Teil von Mecklenburg-Vorpommern und am Alpenrand</li> <li>SiO<sub>2</sub>-Gehalt schwankt zwischen 25 und 95 %</li> </ul>
Flint	<ul style="list-style-type: none"> <li>besteht aus krypto- bis mikrokristallinem SiO<sub>2</sub>, es sind stets Anteile an Opal enthalten (ca. 1 bis 3 Vol.-%)</li> <li>ist die in Kieselkreide vorkommende Ausscheidung von Kieselsäure</li> <li>nach internationalen Erfahrungen geht man davon aus, dass nur leichte Flinte mit einer Kornrohichte von &lt; 2,20 kg/dm<sup>3</sup> reaktiv sind</li> <li>reaktive Flinte zeigen im Beton deutliche Reaktionsränder</li> </ul>
Kieselschiefer	<ul style="list-style-type: none"> <li>enthält Mikroquarz, Chalcedon, Opal</li> <li>ist verbreitet im Thüringer Schiefergebirge und im Harz, tritt aber auch als Sekundärbestandteil in Kiesen auf (Thüringer Becken, Sachsen-Anhalt, Alpenvorland)</li> <li>viele petrographische Varianten, die alle reaktiv sein können</li> </ul>
Hornstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>wird aus dichtem, undurchsichtigem Quarz oder Opal gebildet</li> <li>die Übergänge zwischen Flint, Kieselschiefer und Hornstein sind oft fließend</li> </ul>
Grauwacke	<ul style="list-style-type: none"> <li>enthält kryptokristallinen und gestressten Quarz, Chalcedon</li> <li>kommt vor in der Lausitz, in geologisch jungen Kieslagern Mitteldeutschlands und des Alpenrandes</li> <li>ist ein sandsteinartiges Gestein aus Quarz und Feldspat mit schlechter Korngrößensortierung</li> </ul>

In Tabelle 2.2 sind nur die wichtigsten alkaliempfindlichen Gesteine aufgeführt, in der Literatur werden aber auch noch weitere alkalireaktive Arten genannt, von denen einige in Tabelle 2.3 aufgelistet sind.



**Tabelle 2.3:** Weitere alkaliempfindliche Gesteinsarten

Gesteinsart	Bemerkung
Porphyr bzw. Quarzporphyr	<ul style="list-style-type: none"> <li>enthalten mikro- und kryptokristallinen Quarz</li> <li>stark wechselnde mineralogische Zusammensetzung</li> <li>wenig bekannte Schadensfälle, aber eindeutige AKR-Schäden an Brückenpfeilern und Wasserbauwerken erkennbar [Sta79]</li> </ul>
Phyllit	<ul style="list-style-type: none"> <li>enthält mikrokristallinen Quarz</li> <li>metamorphes, polymineralisches Gestein, entsteht bei der Umwandlung von Schichtsilikaten</li> <li>verursacht starke Schäden, die auf Glimmer zurückgeführt werden [Gil73, Ido97]</li> </ul>
Tonschiefer	<ul style="list-style-type: none"> <li>metamorphes Silikatgestein</li> <li>wird bei [Ido97, Dun73] als reaktiv aufgeführt</li> <li>verursacht starke Schäden, die auf Glimmer zurückgeführt werden [Gil73, Ido97]</li> </ul>
Quarzite	<ul style="list-style-type: none"> <li>metamorph entstandene Variante ist gefährdet</li> <li>mitunter handelt es sich um verdichteten Sandstein oder durch Druck und Temperatur verdichtete bzw. umgewandelte Gesteine</li> <li>insbesondere Quarzite aus den Nord- und Südost-Staaten der USA führten zu AKR-Schäden [Ido97]</li> </ul>

Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint, die als hoch reaktiv gelten, werden nach Alkali-Richtlinie vom Februar 2007 [Alk-RiLi07], Teil 2, in die folgenden Alkaliempfindlichkeitsklassen eingeteilt:

E I-O	Unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch Opalsandstein einschließlich Kieselkreide
E II-O	Bedingt brauchbar hinsichtlich Alkalireaktion durch Opalsandstein einschließlich Kieselkreide
E III-O	Bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch Opalsandstein einschließlich Kieselkreide
E I-OF	Unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint
E II-OF	Bedingt brauchbar hinsichtlich Alkalireaktion durch Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint
E III-OF	Bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint

aktuell

Die Einteilung der Gesteinskörnungen in diese Empfindlichkeitsklassen erfolgt je nach Masseanteil und Korngruppe der enthaltenen empfindlichen Bestandteile Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint und ist in der Alkali-Richtlinie nachzulesen.

Präkambische Grauwacke, die als weniger reaktiv gilt und deren Schädigungspotential sich erst nach Jahren oder Jahrzehnten entfaltet, wurde nach Alkali-Richtlinie vom Mai 2001, Teil 3 [Alk-RiLi01] folgendermaßen eingeteilt:

E I-G	Unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch präkambrische Grauwacke	veraltet
E II-G	Bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch präkambrische Grauwacke	

Durch die Neuregelung der Alkali-Richtlinie von Februar 2007 [Alk-RiLi07] entfallen diese Klassen aber, stattdessen sind nun nach Teil 3 die folgenden gültig:

E I-S	Unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen und	aktuell
E III-S	Bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion durch gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen	

Diese neuen Klassen gelten für:

- gebrochene präkambrische Grauwacke,
- gebrochenen Quarzporphyr (Rhyolith),
- gebrochenen Kies des Oberrheins,
- rezyklierte Gesteinskörnungen,
- Kiese, die mehr als 10 % gebrochene Anteile der bereits genannten Gesteinskörnungen enthalten,
- gebrochene Gesteinskörnungen, für die im Geltungsbereich der Richtlinie keine baupraktischen Erfahrungen vorliegen sowie
- alle anderen gebrochenen Gesteinskörnungen, die nach Abschnitt 1.2 der Alkali-Richtlinie nicht als unbedenklich eingestuft werden können.

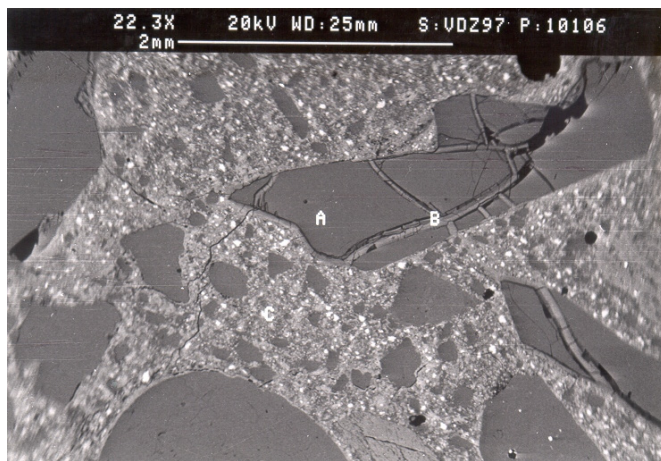
Eine Definition der Klasse E II-S sieht die Richtlinie bisher nicht vor, da die bisherigen Untersuchungsergebnisse eine so weitgehende Differenzierung nicht zulassen.

Je nach dem welche alkaliempfindliche Gesteinskörnung bei der Herstellung von Beton zum Einsatz kommt, unterscheidet sich dessen Performance hinsichtlich Dehnung. Für die Zuschlagkörnungen Opal, Duranglas sowie Grauwacke ist dies in Bild 2.9 (siehe Seite 14) aufgetragen.

Neben den natürlichen Gesteinsarten gibt es künstliche Zuschlagkörnungen, die im Beton ebenfalls eine AKR provozieren können. Dies trifft z.B. auf Recycling-Material (aus Beton) oder auf Glasmehl als Zusatzstoff bzw. auf Glasbruch als Zuschlagstoff zum Beton zu [Rem05]. Aber auch SiC-Hartstoff gehört dazu, insbesondere dann, wenn deutliche Gehalte an Cristoballit vorliegen, wie das z.B. in Recycling-Material aus Brennhilfsmittel-Bruch der Feinkeramik der Fall ist [Fre00].

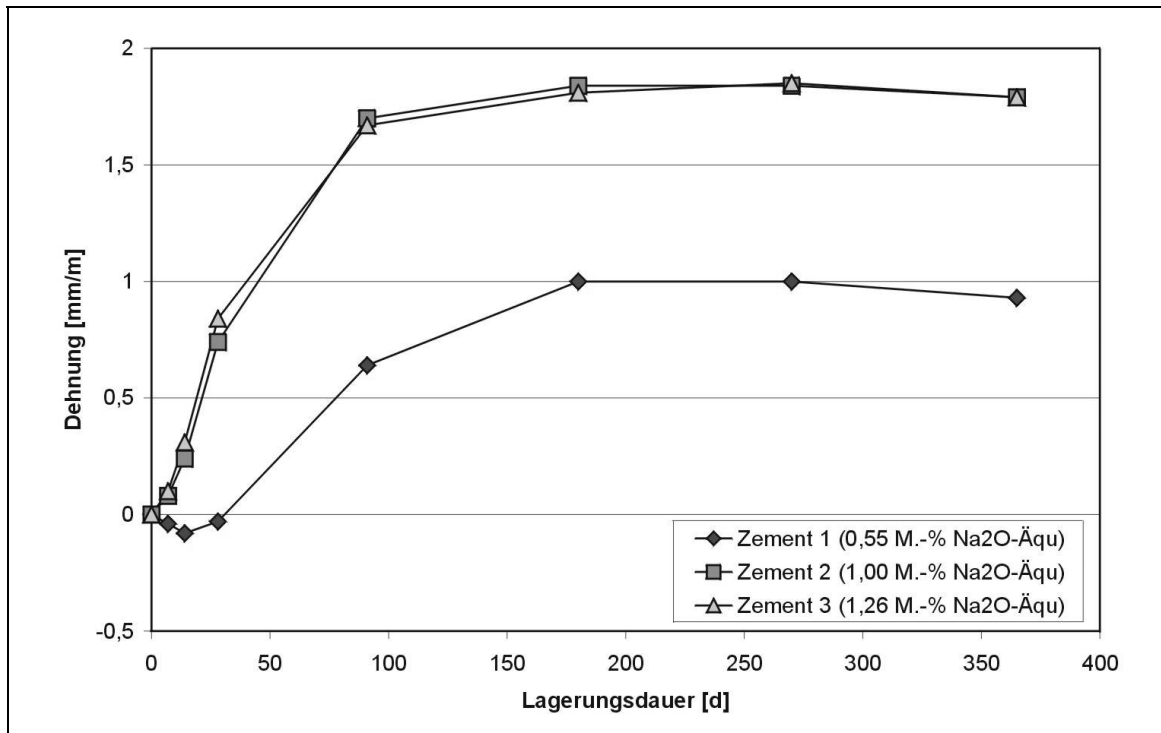
Borosilikatglas (auch als Duranglas bezeichnet) mit seinem hohen Anteil an amorphem  $\text{SiO}_2$  verhält sich ebenfalls alkalireaktiv und gilt wegen seiner konstanten Zusammensetzung derzeit weltweit als Standardzuschlag bei AKR-Prüfungen. Das Glas wird vor Verwendung in entsprechende Kornfraktionen (Scherben) gebrochen. Durch die mechanische Beanspruchung des Materials entstehen Mikrorisse und die Scherbenform ist eher unregelmäßig, so dass das Borosilikatglas keine definierte Oberflächenbeschaffenheit aufweist.

Bild 2.6 zeigt in die Zementsteinmatrix eingebettete Borosilikatglasscherben, die in Folge einer AKR gerissen sind:



**Bild 2.6:** REM-Aufnahme: Borosilikatglasscherben in Zementsteinmatrix [Spr98]

Nach Untersuchungen des VDZ [SB-AiF] reagiert das Material überempfindlich (Bild 2.7). Es wurden Betone aus drei Portlandzementen (600 kg Zement pro  $\text{m}^3$  Beton) mit unterschiedlichem Alkaliäquivalent untersucht, bei denen 40 % der inerten Gesteinskörnung (Rheinkies) durch Duranglasscherben der Fraktion 2/8 mm ersetzt sind. Wie nicht anders zu erwarten, zeigen die Betonmischungen mit den Zementen, die ein  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $> 0,6 \text{ M.-%}$  (vergleiche Abschnitt 2.2.2, S.14 ff.) aufweisen (Zement 2 und 3), schon innerhalb der ersten 50 Tage eine erhöhte Dehnung, die auf eine AKR zurückzuführen ist. Doch auch der eigentliche NA-Zement (Zement 1) mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $< 0,6 \text{ M.-%}$ , expandiert und erreicht nach ca. 180 Tagen eine maximale Dehnung von 1 mm/m und überschreitet damit deutlich den Grenzwert von 0,6 mm/m.

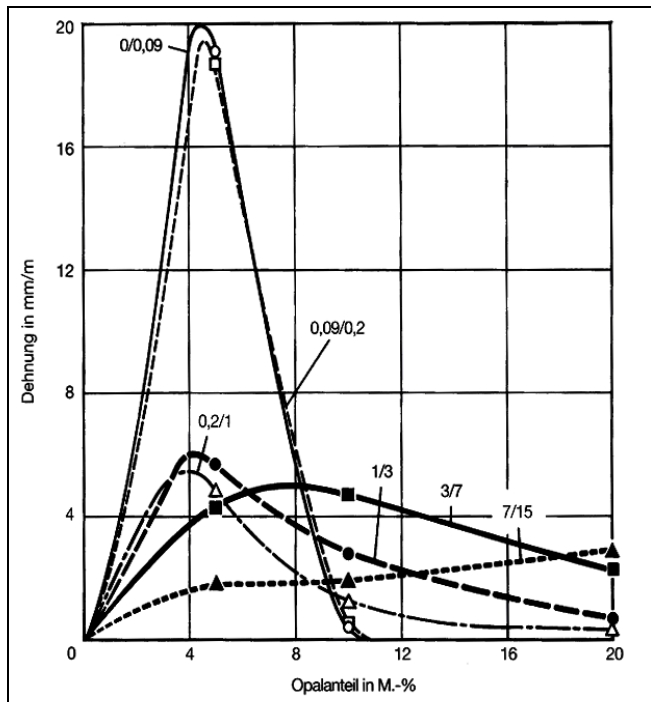


**Bild 2.7:** Dehnungsverhalten von Betonen mit 40 % Duranglas der Körnung 2/8mm; Daten aus [SB-AiF]

Bei der Verwendung von Duranglas unter Laborbedingungen ist also nicht immer eine zuverlässige Aussage darüber möglich, ob mit der getesteten Betonrezeptur auch eine AKR unter Praxisbedingungen stattfinden würde.

#### 2.2.1.2 MENGE UND KORNGRÖÖE DER ZUSCHLAGKÖRNUNG

Der Reaktionsfortschritt einer AKR und das Maß der Betondehnung hängen nicht nur von der Art, sondern auch von Menge und Korngröße der im Beton eingesetzten Zuschlagkörnung ab, wie verschiedene Untersuchungen zeigen [Sta40, Loc75, Sie96]. Besonders bei Verwendung des sehr reaktionsfreudigen reinen Opals wird dies deutlich (Bild 2.8). So erreicht nach [Loc75] ein extrem zementreicher Beton (Zementgehalt  $600 \text{ kg/m}^3$ ) die höchste Dehnung, wenn der Opal in den feinsten Kornfraktionen 0/0,09 und 0,09/0,2 mm des Zuschlages zugesetzt wird. Bereits nach 21 Tagen Feuchtlagerung bei  $40^\circ\text{C}$  können für die Fraktion 0/0,09 mm Dehnungen bis zu  $14 \text{ mm/m}$  gemessen werden. Nach 6 Monaten sind  $20 \text{ mm/m}$  Dehnung erreicht. Mit zunehmendem Opalgehalt steigt die Dehnung zunächst an und erreicht bei einem Gehalt von 4,5 Gew.-% Opal ein Maximum. Mit weiter zunehmenden Opalgehalt fällt die Dehnung wieder ab. Es tritt keine Dehnung mehr auf, wenn der Opalgehalt 10 % in der Fraktion 0/0,09 mm des Zuschlages beträgt. Für die Kornfraktion 0,09/0,2 mm ergibt sich ein ähnlicher Zusammenhang. Auch für größere Opalfraktionen ist ein Maximum an Dehnung feststellbar, welches sich mit zunehmender Korngröße zu höheren Opalgehalten verschiebt. Man spricht von einem Pessimum, wenn die zugesetzte Zuschlagkörnung bei einer bestimmten Menge und Korngröße im Beton eine maximale Dehnung hervorruft.

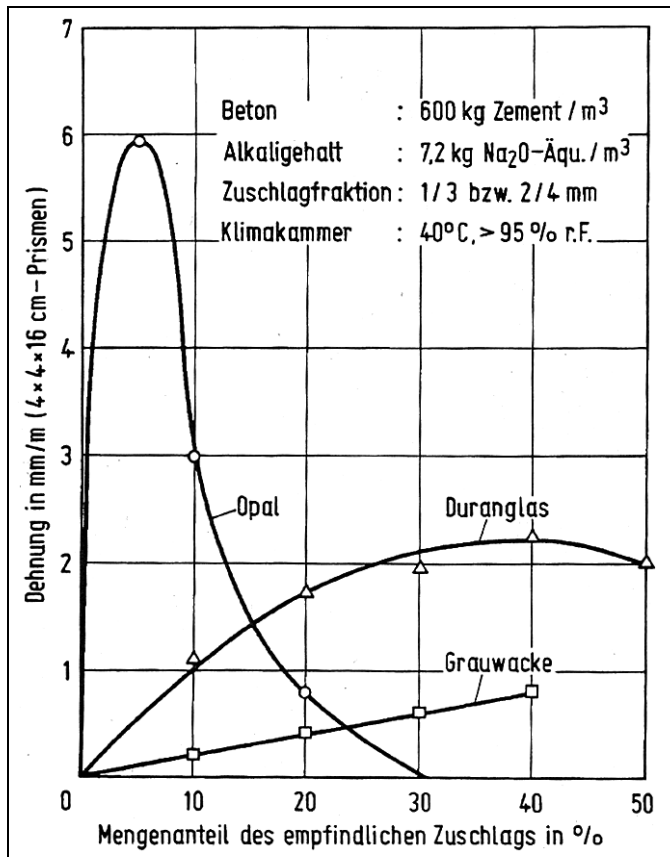


**Bild 2.8:** Einfluss des Opalgehaltes in den verschiedenen Korngruppen des Zuschlags auf die Dehnung von Betonprismen nach 6 Monaten [Loc75]

Der dargestellte Zusammenhang zeigt, dass bei Überschreiten einer bestimmten Mindestmenge an alkaliempfindlichem Opal keinerlei Dehnung mehr auftritt. Dennoch kann man davon ausgehen, dass auch in solchen Fällen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion abläuft. Allerdings muss man zwischen dem chemischen Vorgang der Alkali-Kieselsäure-Reaktion und dem Alkalitreiben unterschieden. Nur letzteres verursacht tatsächlich eine Schädigung des Betons [Loc75].

Bei der Verwendung von Grauwacke ergibt sich nach [Sie96] ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Korngröße des Zuschlags und Dehnung des Betons. Dabei erreicht der Beton dann die größte Dehnung, wenn dieser nur Grauwacke der Fraktion 8/16 mm enthält. Bei gleichem Grauwackeanteil von insgesamt 50 %, aber mit sinkendem Anteil der Fraktion 8/16 mm und damit gleichermaßen zunehmenden Gehalt im Bereich kleinerer Korngrößen, nimmt der Wert der Enddehnung ab. Die geringste Dehnung erzielt der Beton, dessen Grauwackeanteil nur im Korngrößenbereich 2/8 mm liegt. Es ist davon auszugehen, dass die Rissbildung, die von kleineren Körnern ausgeht, von der umgebenden Matrix besser aufgefangen werden kann, während sich die ausgeprägten Risse in größeren Körnern in die Zementsteinmatrix fortsetzen und so zu größerer Dehnung des Betons führen [Sie96].

Auch [Spr98] vergleicht unterschiedliche alkalireaktive Zuschlagkörnungen und stellt bei Verwendung von Opal ebenso wie für Duranglas ein Pessimum für maximale Betondehnung fest. Beim Einsatz von Grauwacke ist ein solches Pessimum hier aber nicht erkennbar, selbst bei einem Mengenanteil von 40 % ist noch kein Maximum durchlaufen (Bild 2.9).



**Bild 2.9:** Einfluss der Zuschlagmenge auf das Dehnungsverhalten von Betonprismen mit verschiedenen alkalireaktiven Zuschlägen [Spr98]

Zusammenfassend ist also festzustellen, dass sich in Abhängigkeit von Art und Menge sowie Partikelgröße des verwendeten Kieselsäureträgers und beim Vorhandensein eines hohen Alkalianteils im Beton eine maximale Dehnung (Pessimum) einstellen kann. Allerdings gilt dies offenbar nicht für alle alkaliempfindlichen Zuschlagkörnungen.

### 2.2.2 EINFLUSS DER ART UND MENGE DES ZEMENTES

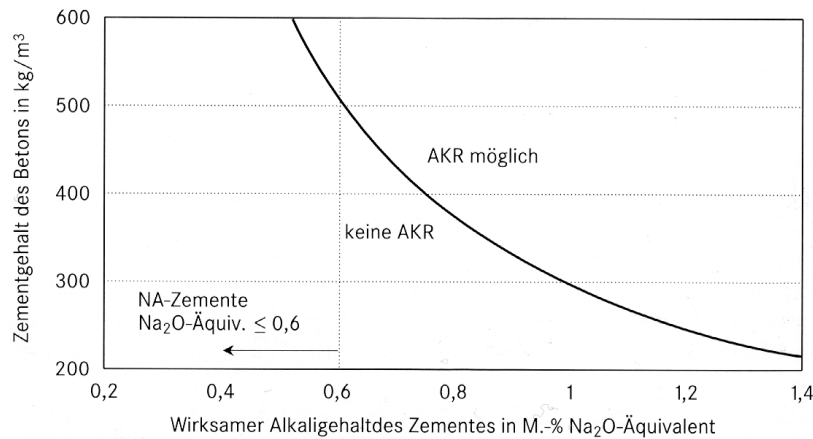
Der Alkalianteil im Beton wird im wesentlichen durch Art und Menge des verwendeten Zementes bestimmt. Nach DIN 1164:2000-11 gilt ein Zement als alkaliarm, wenn er ein Alkali-Äquivalent ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} < 0,6 \text{ M.-%}$ ) aufweist. Wird ein solcher Zement, auch NA-Zement genannt, in praxisüblichen Mengen (also bis ca.  $500 \text{ kg/m}^3$ ) zur Herstellung von Beton verwendet, so ist eine betonschädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion nicht zu erwarten [Loc73]. Das Alkali-Äquivalent ergibt sich aus dem im Zement enthaltenen Oxidanteilen an  $\text{Na}_2\text{O}$  und  $\text{K}_2\text{O}$  und berücksichtigt deren Molmassenverhältnis. Es errechnet sich wie folgt:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O} [\text{M.-%}] \quad (2.7)$$

Der im Beton enthaltene absolute Gehalt an Alkalien hängt nicht nur vom Alkaligehalt des Zementes, sondern auch von dessen zugesetzter Menge ab. Er berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$m_{\text{äquiv}} = z \cdot \text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}/100 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{mit } z = \text{Zementmenge [kg/m}^3\text{]} \quad (2.8)$$

Nach [Loc73] muss die absolute Menge an Alkalien mindestens 3 kg/m<sup>3</sup> im Beton betragen, um bei Verwendung von opalhaltigen Zuschlägen eine betonschädigende AKR zu provozieren. In Bild 2.10 sind die Grenzen der spezifischen Zementmenge pro Kubikmeter Beton zur Vermeidung einer AKR in Abhängigkeit vom Alkaligehalt aufgetragen:



**Bild 2.10:** Spezifische Zementmenge im Beton zur Vermeidung einer AKR in Abhängigkeit vom Na<sub>2</sub>O-Äquivalent [Sta01]

Je nach Zementart liegen die Alkalien in unterschiedlich gebundener Form vor. Bei Portlandzement (CEM I) sind 60 bis 80 % der Alkalien in Alkalisulfaten gebunden. Der Rest ist in die Klinkerphasen eingebaut (siehe Tabelle 2.4). Alkalisulfate gehen sehr schnell nach Zugabe des Anmachwassers in Lösung, während die in den Klinkerphasen enthaltenen Alkalien erst bei deren Hydratation freigesetzt werden. In CEM II und CEM III sind neben dem Portlandzementklinker noch Zumahlstoffe wie Hüttensand oder Flugasche etc. in unterschiedlicher Menge enthalten, die ihrerseits einen Anteil zum Alkaligehalt des Zementes leisten können (siehe dazu Kapitel 2.2.4, Seite 18). Die gesamte Menge Alkalien eines jeden Zementbestandteils kann also nur dann als mobilisierbar betrachtet werden, wenn man von seiner vollständigen Umsetzung ausgeht [Sch01].

**Tabelle 2.4:** Durchschnittliche Alkaligehalte der Klinkerphasen [Sta08]

Oxid		Klinkerphase			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> (A,F)
K <sub>2</sub> O	M.-%	0,1...0,3	0,6...1,3	0,3...0,8	0,0...0,3
Na <sub>2</sub> O		0,1...0,3	0,0...1,1	0,2...4,0	0,0...0,9

Nicht alle der in Lösung gehenden Alkalien stehen dann tatsächlich für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion zur Verfügung, da sie auch in die entstehenden Hydratationsprodukte des Zementes eingebaut werden. Die CSH-Phasen binden Alkalien je nach stöchiometrischer Zusammensetzung unterschiedlich stark. Es ist allerdings nicht bekannt, ob sie dort dauerhaft gebunden bleiben oder ob sie unter bestimmten Einflüssen wie

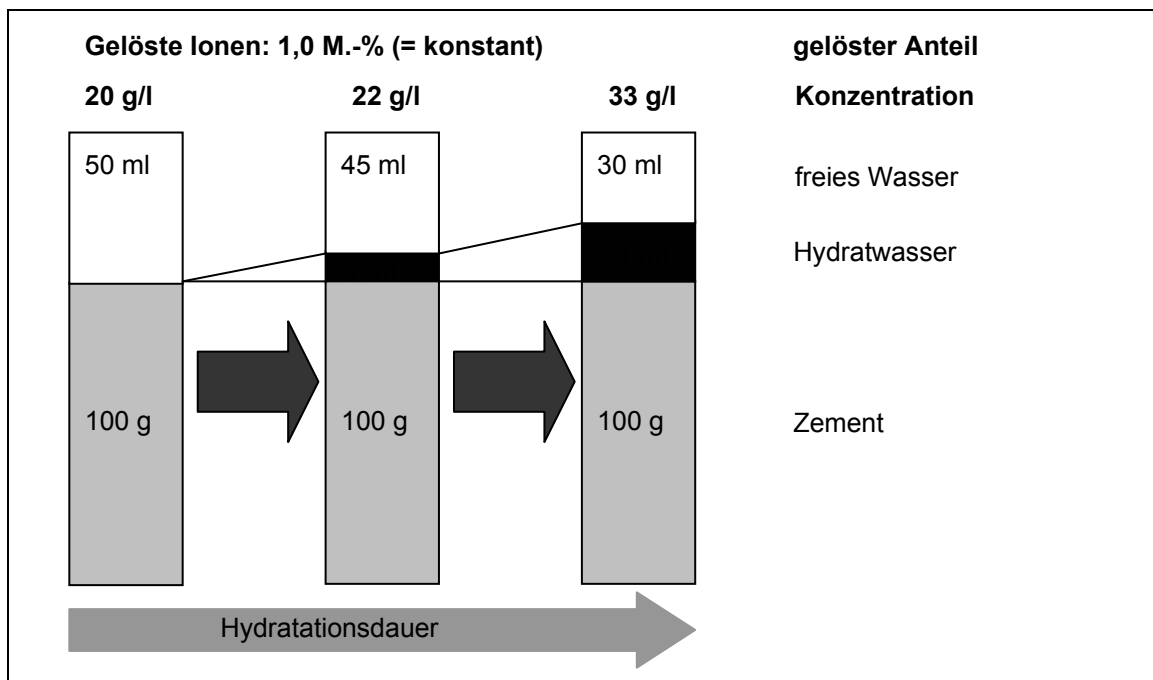
z.B. einer Karbonatisierung wieder freigesetzt werden und so erneut für eine AKR zur Verfügung stehen [Sch01].

### 2.2.3 EINFLUSS DES WASSER-ZEMENT-WERTES

Praxisübliche Wasser-Zement-Werte ( $w/z$ ), die das Verhältnis von Wasser zu Zement im Beton ausdrücken, liegen zwischen 0,35 und 0,6. Zur vollständigen Hydratation der Zementklinkerphasen, was meist Jahre dauern kann, ist ein  $w/z$  von 0,4 notwendig [Grü01]. Selbst bei relativ niedrigen  $w/z$ -Werten und bei optimaler Packungsdichte verbleiben bei der Entstehung der Hydratationsprodukte immer wassergefüllte Zwischenräume, die als Gelporen (Durchmesser liegt im Nanometer-Bereich) bezeichnet werden [Grü01]. Steht mehr Wasser zur Verfügung, als bei der Hydratation verbraucht wird, so verbleibt dieses in so genannten Kapillarporen (Durchmesser ca. 0,1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ ), die ca. 1000 mal so groß sind wie die Gelporen [Spri07].

Das in den Gel- und Kapillarporen enthaltene Wasser mit seinen gelösten Inhaltsstoffen wird als Porenlösung bezeichnet. Diese ist für den Ablauf der Alkali-Kieselsäure-Reaktion von zentraler Bedeutung, da sie als Diffusionsmedium eine Brücke zwischen den festen Hydratationsprodukten und der festen Zuschlagkörnung darstellt, über die ein Stoffaustausch löslicher Bestandteile erfolgen kann [Ött04].

In Abhängigkeit vom w/z-Wert liegt mehr oder weniger Porenlösung in stärkerer oder schwächerer Konzentration vor. Auch durch den Hydratationsfortschritt, der Wasser bindet, verändert sich, trotz u.U. konstanter Menge an gelösten Ionen, die Konzentration der Porenlösung (siehe Bild 2.11).



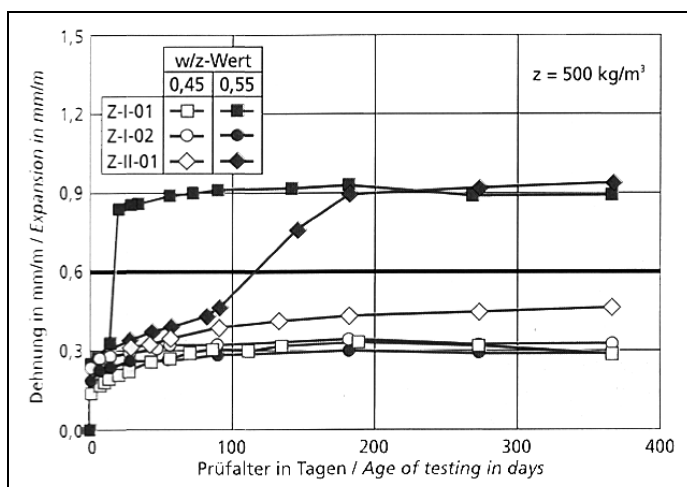
**Bild 2.11:** Einfluss der Verringerung des freien Wassers auf die Konzentration der Porenlösung [Sch04]

Je höher der w/z-Wert bei der Herstellung eines Betons gewählt wird, desto mehr steigt die Reaktionsgeschwindigkeit der Klinkerphasen, wobei außerdem ein höherer Hydrata-



tionsgrad erreicht wird [Loc00]. Die im Klinker gebundenen Alkalien können also schneller und vermehrt an die Porenlösung abgegeben werden. Gleichzeitig ist die Konzentration der Alkalien in der Porenlösung aber geringer, da der Gehalt an freiem Wasser höher ist als bei Betonen, die mit geringerem w/z-Wert hergestellt wurden. Ist die Alkalikonzentration in der Porenlösung geringer, so werden weniger Alkalien in die CSH-Phasen eingebunden. Die höhere Alkalifreisetzung aus dem Klinker und die damit verbundene geringere Aufnahme der Alkalien in die CSH-Phasen kann dazu führen, dass bei erhöhten w/z-Werten absolut mehr Alkalien in der Porenlösung vorliegen als bei Betonen mit zwar gleicher Zusammensetzung, aber geringerem w/z-Wert [Sch04].

Bei Untersuchungen von [Bon86] wurden Betone mit alkaliempfindlichen Opalsandstein und Flint aus Norddeutschland hergestellt. Es zeigte sich, dass bei einem w/z-Wert von 0,55 größere Dehnungen an Balken und stärkere Rissbildungen an 30-cm-Würfeln auftraten als bei einem w/z-Wert von 0,45 bei sonst gleicher Betonzusammensetzung und wenn kein NA-Zement verwendet wird. [Sie01, Sie02] stellten fest, dass bei Verwendung eines alkalireichen Zementes (Z-I-01, Bild 2.12) und einem w/z-Wert von 0,45 keine Dehnungen auftraten, die auf eine AKR hinweisen. Wird allerdings bei gleicher Betonzusammensetzung ein w/z-Wert von 0,55 verwendet, so ist bereits nach einem Monat die kritische Dehnung von 0,6 mm/m überschritten und erreicht nach drei Monaten eine Dehnung von 0,9 mm/m. In beiden Fällen lagerten die Proben bei 40 °C in der Nebelkammer.



**Bild 2.12:** Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementen in Abhängigkeit vom w/z [Sie02]

Wird bei Betonen als alkalireaktive Gesteinskörnung Grauwacke eingesetzt, so nimmt nach Absenkung des w/z-Wertes von 0,6 auf 0,45 die Dehnung von 1,2 mm/m auf 2,4 mm/m zu, bei weiterer Absenkung des w/z nimmt die Dehnung wieder geringfügig ab [Sie96].

Nach [Sie96] könnte das unterschiedliche Verhalten von Betonen mit Opalsandstein bzw. Grauwacke darin begründet sein, dass sich unterschiedliche Mengen an quellfähigem Alkali-Kieselsäure-Gel bilden. Bei Opalsandstein sind dies erhebliche Mengen, die an der Oberfläche des Zuschlagkorns auftreten. Ein höherer w/z-Wert bedingt eine we-

niger dichte Zementsteinmatrix, so dass eine größere Wassermenge bis zum Gel vorbringen kann und damit zu größerem treibendem Schaden führt als bei kleinerem w/z-Wert und dichter Matrix. Bei Grauwacke bildet sich eher weniger Alkali-Kieselsäure-Gel und zwar bevorzugt im Inneren des Zuschlagkorns.

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen, dass die Höhe des w/z-Wertes zwar das Dehnungsverhalten von Betonzusammensetzungen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen beeinflusst, eine direkte Abhängigkeit jedoch nicht nachgewiesen werden kann.

### 2.2.4 EINFLUSS VON BETONZUSATZSTOFFEN

#### 2.2.4.1 LATENT-HYDRAULISCHE ZUSATZSTOFFE

Hüttensand (HS) ist glasig erstarrte Schlacke und der wichtigste latent-hydraulische Stoff. Er enthält hauptsächlich  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Damit ist seine Zusammensetzung ähnlich der des Portlandzementes, er ist aber kalkärmer. Durch das freigesetzte  $\text{Ca(OH)}_2$  des Zementes erfährt HS eine alkalische Anregung, die ihn in einem technisch nutzbaren Zeitraum hydraulisch erhärten lässt, allerdings deutlich verzögert im Vergleich zum Zement. Es entstehen CSH-Phasen, die aber kalkärmer sind als die Hydratationsprodukte des Zementes [Sta00].

Nach DIN 1164-1:1994-10 galten nicht nur Portlandzemente (CEM I) mit einem Alkali-Äquivalent  $< 0,6 \text{ M.-%}$  als alkaliarm, sondern auch:

- Hochofenzemente CEM III/A mit einem Hüttensandgehalt  $\geq 50 \text{ M.-%}$  und einem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}} \leq 1,10 \text{ M.-%}$  sowie
- Hochofenzemente CEM III/B mit einem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}} \leq 2,00 \text{ M.-%}$ .

Bei Verwendung dieser Zemente in Verbindung mit alkaliempfindlichen Zuschlagskörnungen ist also trotz erhöhtem Alkaligehalt gegenüber einem CEM I – NA nicht mit einer betonschädigenden AKR zu rechnen.

Nach Untersuchungen von [Sie01] ist im Januar 1999 die Norm mit dem Ergänzungsblatt A1 um weitere NA-Zemente ergänzt worden. Diese fanden auch in die überarbeitete DIN 1164:2000-11 Eingang. Neben den bereits genannten gelten nun also noch zusätzlich folgende Zemente als NA-Zemente:

- Portlandhüttenzemente CEM II/B-S mit einem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}} \leq 0,7 \text{ M.-%}$ ,
- Hochofenzemente CEM III/A mit einem Hüttensandgehalt von  $36 - 49 \text{ M.-%}$  und einem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}} \leq 0,95 \text{ M.-%}$  sowie
- Hochofenzemente CEM III/C mit einem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}} \leq 2,00 \text{ M.-%}$ .

Letzt genannter Zement wird wegen seiner beschränkten zulässigen Anwendungsbereiche in Deutschland jedoch kaum verwendet.

Es gilt jedoch, dass für hüttensandhaltige Zemente der Anteil der enthaltenen Alkalien höher sein kann als bei reinen Portlandzementen, ohne dass eine AKR provoziert wird.

Dies liegt daran, dass die im Hüttensand gebundenen Alkalien aufgrund der glasigen Struktur des HS nur bedingt freigesetzt werden und die verfügbaren Alkalien in der Porenlösung verringert sind [Bok02]. Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass Hydratationsprodukte des Hüttensandes lösliche Alkalien aus dem Zementklinker zu binden vermögen [Kli63, Mat65]. Nach [Sch04] beruht die Bindung von Alkalien bei hüttensandhaltigen Zementen auf der Bildung von CSH-Phasen, die bei der latent-hydraulischen Reaktion entstehen. Jedoch ist der geringere Anteil von Alkalien in der Porenlösung weniger auf eine verstärkte Alkalibindung in den CSH-Phasen zurück zu führen, sondern in erster Linie auf den sinkenden Klinkeranteil im Zement.

#### 2.2.4.2 PUZZOLANISCHE ZUSATZSTOFFE

Puzzolane sind Stoffe natürlichen oder künstlichen Ursprungs, die reaktionsfähige Kieselsäure enthalten. Im Gegensatz zum Hüttensand haben sie keine unmittelbar hydraulischen Eigenschaften. Das in Puzzolanen enthaltene  $\text{SiO}_2$  reagiert bei Anwesenheit von Wasser mit dem  $\text{Ca(OH)}_2$  des Zementklinkers zu festigkeitsbildenden CSH-Phasen [Sta00].

In der Literatur [Pet92, Tho95, Gud99] wird die Zugabe puzzolanischer Zusatzstoffe wie Flugasche oder Mikrosilica zum Beton oft als vorbeugende Maßnahme zur Verhinderung einer AKR beschrieben. Als Bestandteile des Zementes oder als Zusatzstoff zum Beton sollen diese Feinstoffe die Alkalien bei der puzzolanischen Reaktion binden. Allerdings ist es umstritten, ob die Bindung der Alkalien tatsächlich dauerhaft ist. Während [Bok02] keine Hinweise finden kann, dass die einmal gebundenen Alkalien wieder frei gesetzt werden, zeigt sich nach Untersuchungen von [Sch04], dass die alkalibindende Wirkung von Mikrosilica zeitlich begrenzt und die Dauerhaftigkeit der Alkalibindung durch Flugasche noch nicht endgültig geklärt ist.

Untersuchungen von [Sie00] ergeben, dass durch den Zusatz puzzolanischer Stoffe die Betondehnung der Proben bei Nebelkammerlagerung mit 40 °C deutlich verringert werden kann, während dies bei Außenlagerung und normaler Bewitterung nicht der Fall ist. Gegenüber Beton ohne Zusatzstoffe treten die Dehnungen lediglich verzögert auf. Demnach kann die Verwendung puzzolanischer Zusatzstoffe zur Vermeidung einer schädigenden AKR nicht empfohlen werden (siehe auch Kapitel 2.3.1, S.23).

#### 2.2.5 EINFLUSS DER ALKALIZUFUHR VON AUßEN

Die Zufuhr von Alkalien als wesentlicher Beitrag zur Entstehung einer AKR erfolgt zumeist aus dem Inneren des Betons. Hier sind in erster Linie der Zement und/oder die Zusatzstoffe zu nennen. Der Eintrag kann jedoch auch aus alkalihaltigen Betonzusatzmitteln (z.B. Verflüssiger) oder aus alkalihaltigen Gesteinskörnungen (z.B. Granit) resultieren [Sta01].

Als wesentlich ist aber auch eine mögliche Alkalizufuhr von außen zu erachten, die über Alkalien vor allem aus Tausalzmitteln oder auch aus Meerwasser erfolgen kann. Selbst wenn bei Verwendung einer alkaliempfindlichen Zuschlagkörnung ein NA-Zement verwendet wird und so eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion eigentlich ausge-

geschlossen sein müsste, kann eine Alkalizufuhr von außen genau diese provozieren. Dabei wirken die niedrigen Alkaligehalte im Zement zunächst schadensverzögernd, können bei äußerer Alkalizufuhr eine betonschädigende AKR aber nicht dauerhaft verhindern [Sta06].

Nach [Cha86] führen die  $\text{Na}^+$ -Ionen aus Tausalzen (z.B. NaCl) in Verbindung mit  $\text{OH}^-$ -Ionen aus freiem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (aus dem Zement) zusammen mit Wasser zu einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion und damit zur Betondehnung.

Für das Verkehrswegenetz in Deutschland kommen vor allem Taumittel auf NaCl-Basis zum Einsatz, die, wie oben bereits ausgeführt, ein Schädigungspotential hinsichtlich AKR aufweisen. Auf Flughäfen dagegen verwendet man Taumittel auf Acetat- (z.B.  $\text{CH}_3\text{COOK}$ ) oder Formiat-Basis (z.B.  $\text{HCOONa}$ ). Diese reagieren hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion deutlich aggressiver [Sta06], was bereits zu zahlreichen AKR-Schäden an militärischen und zivilen Flughäfen, vor allem in den USA, geführt hat [Ran06].

Es ist zwar unbestritten, dass NaCl eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion verstärkt, das genaue Ausmaß ist bisher aber nicht hinreichend bekannt und wird z. Z. untersucht. Denn auch bei Verwendung nicht reaktiver Gesteinskörnungen treten etwas größere Dehnungen auf, wenn die Probekörper in 3 %iger oder 10 %iger NaCl-Lösung gelagert werden [Sie06].

### 2.2.6 EINFLUSS DER ART DER PROBEKÖRPER UND DEREN LAGERUNG

Für die Untersuchung der AKR im Labormaßstab werden Probekörper unterschiedlicher Geometrien verwendet, z.B.:

- Mörtelprismen  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$
- Betonbalken  $8 \times 8 \times 25 \text{ cm}^3 / 10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3 / 10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$
- Betonwürfel  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 / 15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3 / 30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$

Je nach den Abmessungen der Probekörper ist deren Dehnungsverhalten oder auch die Neigung zur Rissbildung unterschiedlich.

Bei normaler Bewitterung dauert es unter Umständen Jahre bis die Auswirkungen einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion sichtbar werden, so dass man bei Untersuchungen im Labor bemüht ist, die Reaktion zu beschleunigen.

[Bon 73] untersuchte das Dehnungsverhalten von AKR-gefährdeten Probekörpern unter folgenden Lagerungsbedingungen:

#### Nebelkammer:

- $40^\circ\text{C}$  und 100 % Luftfeuchte,
- Betonbalken ( $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ ) und Würfel  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$  werden direkt nach dem Entformen eingelagert,

Freilandlagerung:

- ungeschützte Lagerung im Freien auf einem Flachdach,
- Balken und 30-cm-Würfel lagern bis zum Alter von 7 Tagen unter feuchten Tüchern, dann im Freien,

Trocken-/Fußbadlagerung:

- 20 °C und 65 % Luftfeuchte, außerdem Fußbad,
- 10-cm-Würfel werden unter den genannten Klimabedingungen eingelagert, einige Probekörper werden nach 28 Tagen bzw. 6 Monaten mit der Unterseite in ein 1 cm hohes Fußbad gestellt,

Verpackte Lagerung:

- 20 °C und 97 % Luftfeuchte, bzw. Lagerung in Folie,
- 30-cm-Würfel werden nach dem Entformen unter den genannten Klimabedingungen eingelagert oder bei 20 °C und dicht verpackt in Folie aufbewahrt.

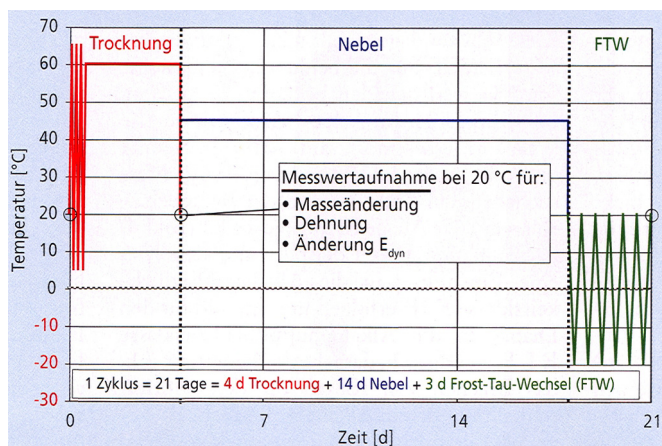
Die ältesten der eingelagerten Probekörper waren bei Abschluss der Untersuchungen 6 Jahre alt. Es zeigte sich, dass die trocken gelagerten Betone (20 °C / 65 % relative Feuchte) keine Schädigungen infolge Alkalireaktivität entwickelten. Die anfänglich trocken, später dann aber im Fußbad gelagerten Proben wiesen erste Schäden in Folge einer AKR frühestens nach ca. 2 bis 4 Wochen Fußbadlagerung auf. Die feucht gelagerten Probekörper (sowohl Freiland- als auch Nebelkammerlagerung) zeigten AKR-Schädigungen spätestens 6 Monate nach Beginn der Lagerung, deren Maximum spätestens  $\frac{1}{2}$  oder 1 Jahr nach der ersten Schadensfeststellung erreicht wurde. Bei der Nebelkammerlagerung trat die Schädigung insgesamt etwas früher ein und fiel höher aus als bei der Freilagerung. Dafür erfolgte die Zunahme der Schäden bei der Freilagerung über einen längeren Zeitraum.

Je nach Lagerungsart unterschieden sich auch die Schadensbilder. Zu Anfang wiesen die durch Nebelkammerlagerung geschädigten Betonwürfel Gelausscheidungen, einige wenige Abplatzungen und wenige feine Risse auf. Im Verlauf der Schädigung kamen Ausblühungen dazu, verstärkte Abplatzungen und zusätzlich wenige grobe Risse. Die in die Nebelkammer eingelagerten Betonbalken zeigten Dehnungen bis maximal 3,5 mm/m. Bei der Freilandlagerung dagegen wiesen die Würfel im Endstadium wenige große und viele feine, netzartig verlaufende Risse auf. Abplatzungen traten nur vereinzelt auf, dafür konnten praktisch keine Ausblühungen und Gelaustritte beobachtet werden (diese könnten jedoch auch durch Witterungseinflüsse abgespült worden sein). Die geschädigten Probekörper aus der Fußbadlagerung wiesen wenige Abplatzungen sowie wenige grobe und feine Risse auf. Dabei traten die Risse bevorzugt im Bereich unterhalb und unmittelbar oberhalb des Wasserspiegels auf. Die verpackt gelagerten Betonwürfel waren ebenfalls gekennzeichnet durch Ausblühungen, Abplatzungen und Risse. Insgesamt war die Schädigung der Würfel bei gleicher Feuchtlagerung und bei der sel-

ben Betonzusammensetzung in der Regel sehr viel stärker ausgeprägt als die Schädigung der Betonbalken.

Die soeben dargestellten Ergebnisse und Beobachtungen von [Bon73] werden gestützt durch zahlreiche weitere in der Literatur aufgeführte Untersuchungen [Loc75, Sie97a, Sie02]. Sie alle zeigen auf, dass der wesentliche Einflussfaktor für die Untersuchung bzw. Provokation einer AKR im Labormaßstab ein kontinuierliches Feuchteangebot ist. Wärme fördert ebenfalls die Entwicklung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion und wirkt sich beschleunigend aus. Bezüglich der Probenkörpergeometrie sind Betonwürfel eher zur Untersuchung eventuell auftretender Risse infolge AKR geeignet, während Betonbalken bzw. Mörtelprismen zur Dehnungsmessung verwendet werden.

Um den baupraktischen Gegebenheiten einer normalen Witterung Rechnung zu tragen, die gekennzeichnet ist durch häufige Temperatur- und Feuchtewechsel, und um damit der Realität näher zu sein, wurde am F.A. Finger-Institut in Weimar eine spezielle Klimawechsellagerung entwickelt. Bauteile aus Beton unterliegen bei ortsüblicher Außenwitterung thermischen und hygrischen Zwangsbeanspruchungen, die zum Stoffaustausch mit der Umgebung sowie zu Transport-, Lösungs- und Ausfällungsvorgängen im Gefüge führen. Dadurch können Schadensmechanismen in Gang gesetzt werden, die die Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigen [Sey05]. Mit der Klimawechsellagerung, die speziell auch auf die AKR-Problematik zugeschnitten ist, können wesentliche Einwirkungen aus Umwelteinflüssen, wie Austrocknung, Befeuchtung, Frost-Tau-Wechsel und auch Taumittleinwirkung, zeitraffend nachgestellt werden. Ein Klimazyklus von 21 Tagen beginnt nach 7-tägiger Vorlagerung der Probekörper bei 20 °C mit einer Trocknungsphase bei wechselnder Temperatur, gefolgt von einer Nebelphase mit konstanter Temperatur und einer anschließenden Frost-Tauwechsel-Beanspruchung [Sta06]. In Bild 2.13 ist ein solcher Zyklus graphisch dargestellt.



**Bild 2.13:** AKR-Klimawechsellagerungszyklus [Sta06]

Die Analyse der verschiedenen Untersuchungsparameter, wie Dehnung der Probekörper, dynamischer E-Modul oder auch Gewichtsschwankungen, erfolgt zerstörungsfrei. Dabei ist sichergestellt, dass sie bei vergleichbarem Feuchtezustand und vorheriger Temperierung auf 20 °C stattfindet. Diese Art der Lagerung führt zu ausgeprägteren

AKR-Schäden, so dass hier der Grenzwert für eine kritische Dehnung der Probekörper kleiner ist als bei einfacher Nebelkammerlagerung [Sta06].

Eine solche Wechsellagerung ist sehr realitätsnah und bietet trotzdem den für Laboruntersuchungen wichtigen Aspekt der Zeitraffung. Allerdings ist sie mit einem hohen apparativen Aufwand verbunden, den nur große Labore und Forschungseinrichtungen leisten können.

## **2.3 PRÜFVERFAHREN**

Für die Prüfung von Gesteinskörnungen oder auch bestimmten Betonrezepturen hinsichtlich deren AKR-Empfindlichkeit sind verschiedene Verfahren entwickelt worden. Mit Hilfe dieser Laboruntersuchungen soll es möglich sein, innerhalb eines verhältnismäßig kurzen Zeitraums (ca. 2 bis 9 Monate), eine Aussage zu treffen, ob auch in der Praxis eine Schädigung eintreten kann, die unter Umständen erst nach 10 bis 30 Jahren sichtbar wird. Die Entwicklung solcher Verfahren ist also nur dann realisierbar, wenn die Möglichkeit besteht, ausgelagerte Probekörper einer Langzeituntersuchung zu unterziehen. Gleichzeitig sollten zum Vergleich entsprechende Schadensfälle aus der Praxis bekannt und hinreichend dokumentiert sein, bei denen außerdem ein Rückschluss auf die Betonzusammensetzung der Bauwerke möglich ist.

Die Modellierung der Praxis der im Einzelfall real herrschenden Umweltbedingungen ist mit einem einzigen Prüfverfahren nicht möglich. Dennoch sollte ein geeignetes Verfahren das praktische Verhalten einer alkaliempfindlichen Gesteinskörnung oder einer bestimmten Betonrezeptur widerspiegeln und möglichst wenige Streuungen aufweisen. Daher wird unterschieden nach Prüfverfahren, mit denen die Reaktivität einer Gesteinskörnung charakterisiert werden kann und nach Performance-Verfahren, die eine Beurteilung ermöglichen sollen, ob der jeweilige verwendete Beton in der Praxis auch langfristig keinen Schaden aufweisen wird [Sie06].

Aufgeführt werden zunächst die in Deutschland üblichen Prüfverfahren.

### **2.3.1 PRÜFUNG DER GESTEINSKÖRNUMG**

#### **2.3.1.1 SCHNELLPRÜFVERFAHREN**

Schnellprüfverfahren erlauben es, innerhalb weniger Wochen und damit sehr schnell, die Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung zu beurteilen. Nachteil dieser Verfahren ist es, dass die Bedingungen sehr „scharf“ sind und so durchaus geeignete Körnungen zu Unrecht von der Verwendung ausgeschlossen werden (falsch positiv). Dafür ist eine falsch negative Beurteilung eher unwahrscheinlich. Sie können daher gut zur Überwachung von Gesteinskörnungen verwendet werden. In Deutschland kommen drei Verfahren zum Einsatz. Seit Februar 2007, mit in Kraft treten der überarbeiteten Alkali-Richtlinie, gilt der DAfStb-Mörtelschnelltest als Referenzverfahren und der modifizierte Mörtelschnelltest als alternatives Verfahren zur Beurteilung einer Gesteinskörnung:

### DAfStb-Mörtelschnelltest:

- Entwickelt von FRANKE/WITT [Fra04] und begründet auf OBERHOLSTER/DAVIES [Obe86]
- Verwendung der gebrochenen Körnung (0,125 bis 4 mm) mit definierter Sieblinie
- Herstellung von 3 Mörtelprismen 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>
- Lagerung in 80 °C heißer, 1molarer NaOH-Lösung für 14 Tage
- Kritischer Grenzwert der Dehnung nach 14 Tagen: 1,0 mm/m

### LMPA-Mörtelschnelltest

- Entwickelt von PHILLIP/EIFERT [Phi04]
- Verwendung der gebrochenen Körnung (0,5 bis 2 mm)
- Herstellung von 3 Mörtelprismen 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>, dabei Erhöhung des Alkaligehaltes des Zementes auf ein Gesamt- Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> von 2,5 M.-% mittels 1molarer NaOH-Lösung
- Lagerung in geschlossenen Behältern über Wasserbad bei 70 °C
- Kritischer Grenzwert der Dehnung nach 21 Tagen: 2,0 mm/m

### Modifizierter Mörtelschnelltest

- Grundlage ist LMPA-Mörtelschnelltest von [Phi04], modifiziert am F.A. Finger-Institut, Weimar [Sta06a]
- Verwendung der gebrochenen Körnung (0,5 bis 2 mm)
- Herstellung von 3 Mörtelprismen 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>, dabei Erhöhung des Alkaligehaltes des Zementes auf ein Gesamt-Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> von 2,5 M.-% mittels 1molarer NaOH-Lösung
- Lagerung in geschlossenen Behältern über Wasserbad bei 70 °C
- Dehnungsmessung nach 14, 21 und 28 Tagen nach vorheriger Temperierung auf 20 °C
- Kritischer Grenzwert der Dehnung nach 28 Tagen: kleiner/gleich 1,5 mm/m → alkaliunempfindlich; 1,5 bis einschließlich 2,0 mm/m → potentiell reaktiv; größer 2,0 mm/m → reaktiv

#### 2.3.1.2 BETONPRÜFUNGEN

Nach Alkali-Richtlinie des DAfStB ist in Deutschland das 40 °C-Nebelkammverfahren als Referenzverfahren zur Prüfung von Gesteinskörnungen vorgesehen. Bei einer Versuchsdauer von 9 Monaten ist die Beurteilung der Gesteinskörnung jedoch erst nach recht langer Zeit möglich. Seit Februar 2007 wird auch der 60 °C-Betonversuch als alternatives Verfahren eingesetzt. Hier kann eine Klassifizierung der Körnung, ob reaktiv oder nicht, schon nach 3 Monaten erfolgen. Bisher können Ge-



steinskörnungen, die nach diesem Verfahren geprüft wurden, aber noch nicht eingestuft werden, da bislang nicht ausreichend Daten gesammelt werden konnten, um ein Abnahmekriterium festzulegen. Es sollen aber weitere Erfahrungen gesammelt werden.

Bei beiden Verfahren muss die zu prüfende Körnung nicht gebrochen werden, sondern wird im Lieferzustand verwendet.

#### 40 °C-Nebelkammerlagerung:

- Geprüft werden die Kornfraktionen 2/16 mm und 2/22mm.
- Es werden 3 Betonbalken (10 x 10 x 50 cm<sup>3</sup>) sowie ein Würfel mit 30 cm Kantenlänge hergestellt.
- Lagerung erfolgt bei 40 °C und 100 % relativer Feuchte über 9 Monate.
- Kritischer Grenzwert der Dehnung nach 9 Monaten liegt bei 0,6 mm/m, in dem die Temperatur- und die Feuchtedehnung eingeschlossen sind.
- Körnung gilt als unbedenklich, wenn Grenzwert nicht überschritten wird und die Rissweite des Würfels unter 2 mm liegt.

#### 60 °C-Betonversuch:

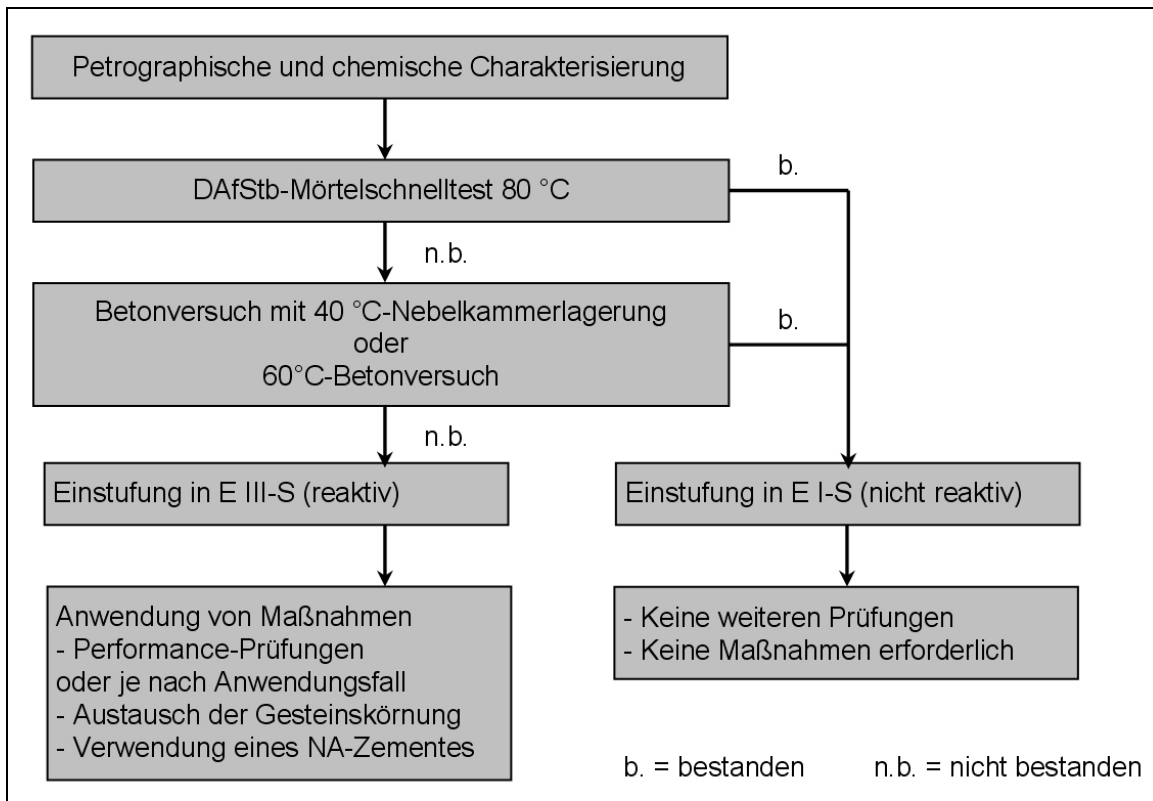
- Beruht auf dem Verfahren der französischen Norm NF P 18-457 und dem RILEM-Verfahren AAR-4.
- Geprüft werden die Kornfraktionen 2/16 mm und 2/22mm.
- Es werden 3 Betonbalken (7,5 x 7,5 x 28 cm<sup>3</sup>) hergestellt.
- Lagerung erfolgt bei 60 °C über Wasserbad in dicht verschlossenen Behältern.
- Dehnungsmessung erfolgt nach 4, 8, 10, 12 sowie ggf. 16 und 20 Wochen nach Herstellung an den auf 20 °C temperierten Proben.
- Kritischer Grenzwert der Dehnung nach 12 Wochen liegt bei 0,3 mm/m (vorläufig festgelegt nach RILEM).

#### 2.3.1.3 PRÜFSHEMA NACH ALKALI-RICHTLINIE

Nach Teil 3 Alkali-Richtlinie soll die Prüfung der Gesteinskörnung mit mehreren Verfahren erfolgen, deren Ablauf im Bild 2.14 schematisch dargestellt ist.

Zunächst sind die Gesteinsproben chemisch und petrographisch zu charakterisieren. Anschließend wird an der Lieferfraktion ein Schnelltest durchgeführt. Wird dieser Test nicht bestanden, so ist die Körnung einem Betonversuch (40 °C-Nebelkammer oder Lagerung bei 60 °C über Wasserbad) zu unterziehen. Ist dieser Test positiv bestanden, so gilt die Körnung als nicht reaktiv und es sind keine weiteren Prüfungen oder Maßnahmen erforderlich. Fällt das Ergebnis des Betonversuches jedoch negativ aus, so kann die Körnung nur dann verwendet werden, wenn keine Alkalizufuhr von außen erfolgt und ein NA-Zement eingesetzt wird. Sie muss ausgetauscht werden, wenn eine Alkalizufuhr von außen gegeben ist. Durch diese Maßnahmen können je nach örtlichen Gegebenheiten eine Reihe von Zementen und auch Gesteinskörnungen nicht zur Betonher-

stellung verwendet werden, so dass es zweckmäßig ist, eine Performance-Prüfung durchzuführen [Sie06].



**Bild 2.14:** Ablaufschema der Gesteinskörnungsprüfung nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie [Sie06]

### 2.3.2 PERFORMANCE-PRÜFUNG

Performance-Prüfungen werden mit der Betonzusammensetzung durchgeführt, die auch bei dem geplanten Bauwerk zum Einsatz kommen soll. Üblicherweise werden für die Laborprobekörper geringfügig erhöhte Zementgehalte (um ca. 5 bis 10 %) verwendet. Für die Performance-Prüfungen kommen sowohl die Nebelkammerlagerung als auch die Lagerung über Wasserbad bei 60 °C in Frage [Sie06]. Insbesondere auch die Klimawechsellagerung ist Gegenstand intensiver Forschungen (siehe auch Kapitel 2.2.6, S.20).

Außerdem ist es möglich, bei Performance-Prüfungen die Alkali-Zufuhr von außen zu simulieren, indem die Probekörper zusätzlich in einer Taumittellösung (z.B. NaCl-Lösung) gelagert werden.

Wenn eine Performance-Prüfung erfolgreich bestanden wird, so kann die getestete Betonzusammensetzung auch in der Praxis zum Einsatz kommen. Genau dann, wenn der geplante Zement dem im Performance-Verfahren eingesetzten entspricht (d.h. wenn sein  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent nicht mehr als 0,05 M.-% höher ist) und wenn die Gesteinskörnung im Schnellprüfverfahren positiv bewertet wird und sich ihre Zusammensetzung gegenüber dem Performance-Test nicht geändert hat. Auch Performance-Prüfungen sind

bisher nicht genormt, so dass Grenzwerte anhand der Praxiserfahrungen, die im Forschungsinstitut der Zementindustrie vorliegen, festgelegt werden [Sie06].

### 2.3.3 INTERNATIONALE PRÜFVERFAHREN

Da es sich bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion um ein weltweites Phänomen handelt, gibt es zahlreiche internationale Prüfverfahren, um die betreffende Gesteinskörnung selbst oder daraus hergestellte Mörtel oder Betone hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität zu untersuchen. Als wichtigste und bekannteste Verfahren seien die NBRI-Prüfmethode, die Prüfverfahren der amerikanischen Normenreihe ASTM und die RILEM-Prüfverfahren genannt und kurz erläutert.

#### 2.3.3.1 NBRI-TESTMETHODE

Die NBRI-Testmethode gilt als ein weltweit anerkanntes Kurzzeitprüfverfahren, um Gesteinskörnungen hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität zu beurteilen. Es wurde von OBERHOLSTER und DAVIES [Obe86] am National Building Research Institute entwickelt und ist unter anderem Grundlage der in ASTM C 1260 [Ast1260] beschriebenen Prüfmethode. Weitere 13 Länder haben dieses Verfahren bisher übernommen, in Europa sind dies Italien, Norwegen und Frankreich.

Die gebrochene Gesteinskörnung wird an Mörtelprismen (25 x 25 x 250 mm<sup>3</sup>) geprüft, die nach ihrer Herstellung zunächst für 1 Tag bei 20 °C und für einen weiteren Tag in 80 °C heißem Wasser gelagert werden. Anschließend misst man die Länge der Prismen (Nullmessung) und lagert für mindestens 10 Tage in 80 °C heißer Natronlauge. Die daraus resultierende Längenänderung wird täglich gemessen. Wird der kritische Grenzwert von 1 mm/m während der Lagerungsdauer nicht überschritten, ist die Gesteinskörnung als unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktivität einzustufen. Bei Dehnungswerten zwischen 1 und 2,5 mm/m gilt die untersuchte Körnung als reaktiv und bei Werten über 2,5 mm/m als stark reaktiv.

#### 2.3.3.2 ASTM-PRÜFVERFAHREN

ASTM C289 – Alkali-Silika-Reaktivität von Gesteinskörnungen (Chem.Verfahren)  
[Ast289]

- Geprüft werden 25 g der Fraktion 0,15/0,30 mm der gebrochenen Körnung;
- Lagerung der Körnung in heißer Natronlauge (80 °C) für 24 Stunden;
- Gravimetrische oder photometrische Bestimmung der Konzentration der in der Lauge gelösten Kieselsäure und Einstufung der Körnung nach „unbedenklich“, „potentiell schädigend“ oder „schädigend“.

ASTM C 227 – Alkalireaktivität von Mörtelsystemen (an Mörtelprismen) [Ast227]

- Verwendung der potentiell alkalireaktiven Körnung bis zu einem Größtkorn von 4,75 mm;

- Herstellung von Mörtelprismen ( $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$ ) mit einem Zement-Gesteinskörnung-Verhältnis von 1 : 2,25, das zugegebene Wasser orientiert sich an einem vorgegebenen Konsistenzmaß;
- Lagerung der Mörtelprismen über Wasserbad in verschlossenen Behältern bei  $38^\circ\text{C}$  für 3 bis 6 Monate;
- Ist die Längenänderung nach 3 Monaten  $< 0,05 \%$  bzw. nach 6 Monaten  $< 0,1 \%$  gilt die Körnung als nicht alkalireaktiv.

### ASTM C 1260 – Alkalireaktivität v. Gesteinskörnungen (an Mörtelprismen) [Ast1260]

- Herstellung von Mörtelprismen ( $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$ );
- Lagerung der Mörtelprismen in 1N Natronlauge bei  $80^\circ\text{C}$  für 14 Tage mit täglicher Messung der Längenänderung;
- Ist die Längenänderung nach 14 Tagen  $< 0,1 \%$  gilt die Körnung als nicht reaktiv, ist sie  $> 0,2 \%$  gilt sie als alkalireaktiv und ist sie  $> 0,1 \%$  aber  $< 0,2 \%$  wird sie als potentiell alkalireaktiv eingestuft.

### ASTM C 1293 – Längenänderung von Beton infolge AKR (an Betonbalken) [Ast1293]

- Getestet wird ein Gemisch aus grober (Größtkorn  $19 \text{ mm}$ ) und feiner (Sand) Gesteinskörnung im Verhältnis 3 : 2.
- Herstellung von Betonbalken ( $75 \times 75 \times 400 \text{ mm}^3$ ) aus Beton mit  $420 \text{ kg}$  Zement je  $\text{m}^3$  Beton und einem w/z von  $0,42$  bis  $0,45$ . Erhöhung des natürlich vorhanden Alkaliäquivalentes ( $0,9 \%$ ) auf  $1,25 \%$  durch Zugabe von NaOH zum Anmachwasser;
- Lagerung der Balken stehend über Wasserbad in verschlossenen Behältern bei  $38^\circ\text{C}$  für 12 Monate;
- Messung der Längenänderung nach 7 und 28 Tagen sowie 2, 3, 6, 9 und 12 Monaten mit jeweils vorangegangener Temperierung der Proben auf  $23^\circ\text{C}$ .
- Wird der Grenzwert von  $0,04 \%$  überschritten, gilt die Gesteinskörnung als alkalireaktiv.

### 2.3.3.3 RILEM-PRÜFVERFAHREN

#### RILEM AAR-1: Petrographische Methode zur Ermittlung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen [RIL-AAR1]

- Petrographische Beurteilung von Gesteinskörnungen
- Einteilung in: Klasse I – sehr wahrscheinlich nicht alkalireaktiv; Klasse II - möglicherweise alkalireaktiv; Klasse III – sehr wahrscheinlich alkalireaktiv

#### RILEM AAR-2: Schnellverfahren zur Ermittlung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen (an Mörtelprismen) [RIL-AAR2]

- Prüfverfahren entspricht ASTM C 1260.

RILEM AAR-3: Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen (an Betonbalken) [RIL-AAR3]

- Prüfverfahren entspricht ASTM C 1293.

RILEM AAR-4: Schnellverfahren zur Ermittlung der Alkali-Reaktivität von Betonmischungen (an Betonbalken) [RIL AAR4]

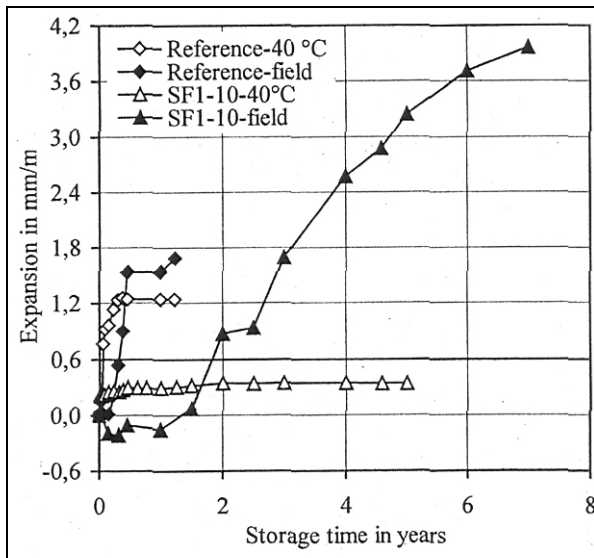
- Prüfverfahren entspricht im Wesentlichen ASTM C 1293.
- Die Lagerung der Betonbalken erfolgt jedoch bei 60 °C für nur 20 Wochen.
- Wird der Grenzwert von 0,03 % überschritten, gilt die Gesteinskörnung als alkali-reaktiv.

**2.4 ÜBERTRAGBARKEIT VON LABORUNTERSUCHUNGEN AUF DIE PRAXIS**

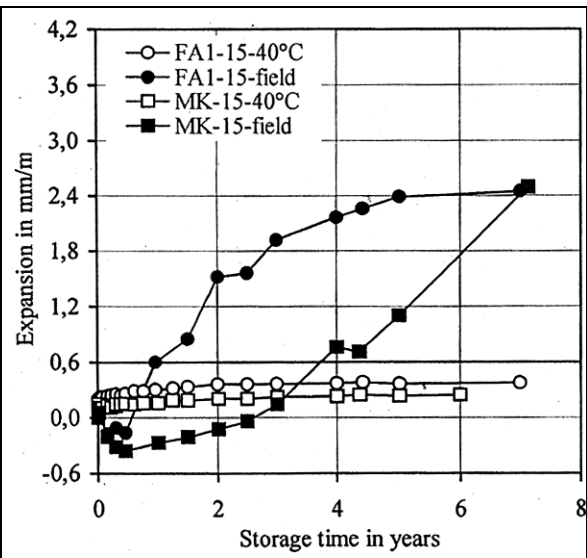
Trotz oder gerade wegen der Vielzahl an Untersuchungen, die im Labor zur Prüfung einer möglichen AKR-Schädigung durchgeführt werden, müssen diese hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf Praxisbedingungen jedoch kritisch hinterfragt werden. Bisher kann nur bedingt angegeben werden, ab welcher gemessenen Dehnung an Laborproben und ab welcher Rissweite und Anzahl von Rissen auch unter praktischen Verhältnissen eine Betonschädigung infolge AKR zu erwarten ist [Sie96]. Zwar sind Schädigungen an Bauwerken, die durch Verwendung von Opalsandstein oder Flint herrühren, gut dokumentiert, es gibt aber nur wenige Bauwerke mit präkambrischer Grauwacke oder Kies mit Kieselschiefer, die Schäden aufweisen [Sie97].

Nach bisheriger Erfahrung gilt es als sicher, dass auch unter ungünstigen Umweltbedingungen keine Betonschädigung in Folge AKR zu erwarten ist, wenn Laborbetone als Balken mit den Abmessungen 10 x 10 x 50 cm<sup>3</sup> mit hohen Zementgehalten und bei Lagerung in der Nebelkammer (40 °C / 100 % relative Feuchte) keine Dehnungen über 0,8 mm/m aufweisen und es zu keiner stärkeren Rissbildung bei 30-cm-Würfeln kommt [Sie96].

Versuche von BOKERN/SIEBEL [Bok01] bestätigen, dass Betone mit opalhaltiger Gesteinskörnung und bei Verwendung von Zementen mit hohem Alkaligehalt sowohl unter baupraktischen Bedingungen Schäden aufweisen (innerhalb eines ½ Jahres) als auch bei Lagerung in der Nebelkammer (innerhalb 1 Monats). Bei zusätzlicher Verwendung von Mikrosilica (10 % bezogen auf den Zementgehalt) zeigten die Betonproben (Bild 2.15), die im Freiland gelagert wurden, nach 2 Jahren erste Dehnungserscheinungen, die innerhalb von 7 Jahren stetig anstiegen (bis 4 mm/m). Die in der Nebelkammer gelagerten Betonproben blieben dagegen unter dem kritischen Grenzwert. Selbst der dynamische E-Modul stieg während der gesamten Testphase an, so dass eine Schädigung unter diesen Bedingungen praktisch nicht gegeben war. Zu ähnlichen Ergebnisse kommt ein weiterer Versuch, bei dem 15 % des Zementes durch Mikrosilica ersetzt wurden: Keine Schädigung bei Nebelkammerlagerung, jedoch stetig wachsende Expansion bei natürlicher Bewitterung.



**Bild 2.15:** Dehnung von Betonprobekörpern mit und ohne Zusatz von Mikrosilica bei Nebelkammer- und Außenlagerung [Bok01]



**Bild 2.16:** Dehnung von Betonprobekörpern mit Zusatz von Flugasche und Metakaolin bei Nebelkammer- und Außenlagerung [Bok01]

Die Verwendung von Flugasche bzw. Metakaolin ergibt nach [Bok01] je nach Lagerungsbedingungen ebenfalls irreführende Laborergebnisse (Bild 2.16). Ähnlich wie bei der Verwendung von Mikrosilica zeigten die in der Nebelkammer gelagerten Proben keine Auffälligkeiten, während bei Freilandlagerung durchaus AKR-Schäden entstanden.

Auch der umgekehrte Effekt, dass Laborbetone bei entsprechender Lagerung alle Zeichen einer Schädigung durch AKR aufweisen, unter normaler Bewitterung aber keine Schäden entwickeln, ist bekannt [Sie06, Sta06a]. Dies trifft vor allem auf Schnellprüfverfahren von Gesteinskörnungen zu, bei denen mitunter in der Praxis ungefährliche Gesteinskörnungen als reaktiv eingestuft werden. Allerdings liegen sie damit deutlich auf der sicheren Seite.

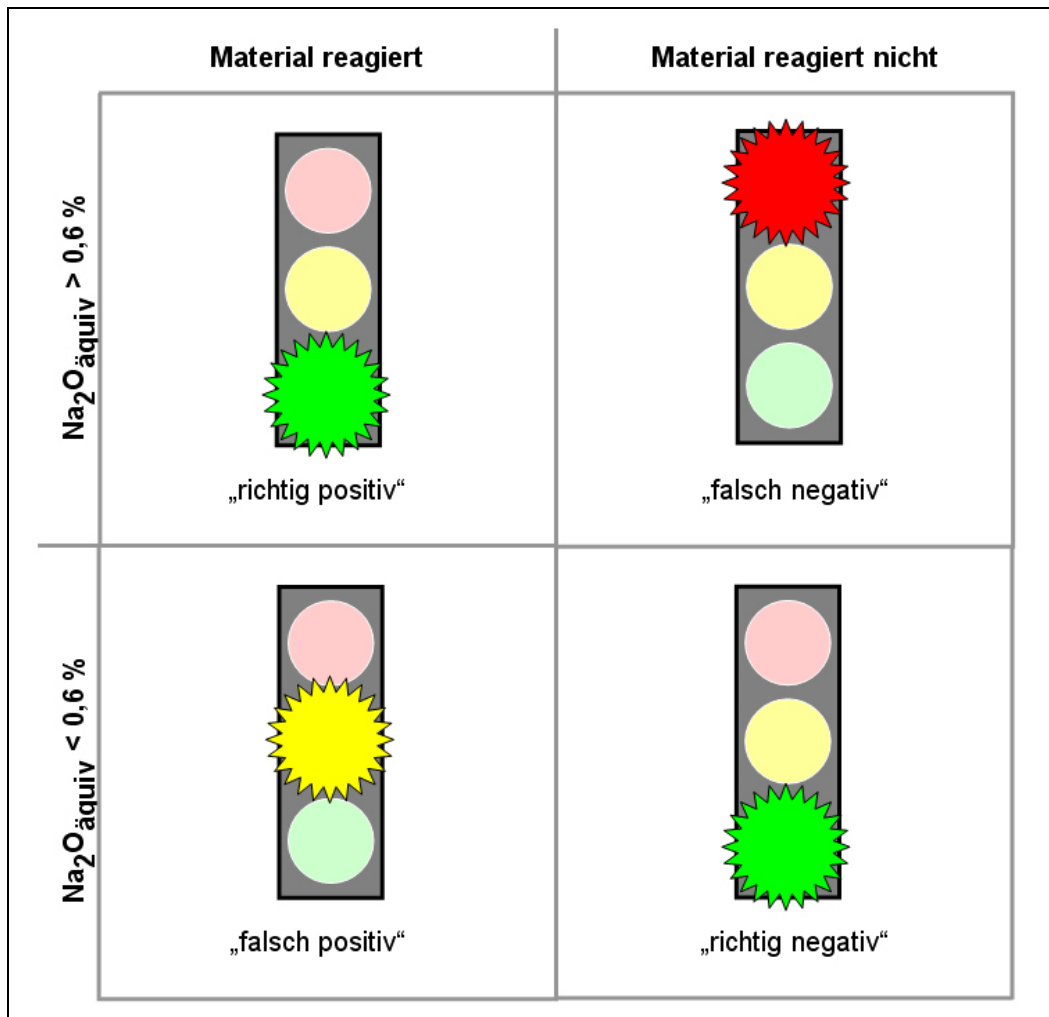
## 2.5 ZUSAMMENFASSUNG UND ZIELSTELLUNG

Die Literaturübersicht zeigt, dass die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton ein breites Forschungsgebiet ist, für das bereits zahlreiche, z. T. sich widersprechende Erkenntnisse vorliegen. Nach wie vor gibt es eine Vielzahl offener Fragestellungen. Während z. B. der Reaktionsablauf der AKR als wissenschaftlich gut untersucht gilt, sind die in der Literatur angegebenen Mechanismen, die zum Quellen des Alkali-Silikat-Gels führen, z. T. widersprüchlich. Als problematisch erweist sich auch die Verwendung neuartiger Taumittel (z.B. auf Flughäfen) auf Acetat- oder Formiat-Basis, die durch die Alkali-Zufuhr von außen in eigentlich nicht reaktiven Betonmischungen dennoch eine Schädigung infolge AKR provozieren können. Hier besteht Forschungsbedarf, genau dies zu verhindern.

Die Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf real existierende Bedingungen muss ebenfalls noch weiter verifiziert werden, um tatsächlich übereinstimmende Ergebnisse

aus Labor- und Praxistests sicherstellen zu können. Aus diesem Grunde werden bereits bestehende Prüfverfahren weiter entwickelt und Untersuchungsbedingungen angepasst. Die Problematik der dabei verwendeten natürlich reaktiven Gesteinskörnungen ist, dass diese lagerstättenbedingte Inhomogenitäten aufweisen, so dass reproduzierbare Ergebnisse schwierig sind.

Ziel der im Folgenden dargestellten Untersuchungen ist es daher, einen für den Nachweis der AKR geeigneten künstlichen Zuschlagstoff als Referenzkörnung zu entwickeln bzw. industrielle Produkte hinsichtlich deren Eignung zu prüfen.



**Bild 2.17:** Anforderungen an eine Referenzkörnung

Borosilikatglasscherben gelten derzeit weltweit als Standardmaterial, zeigen in der Praxis aber deutliche Überempfindlichkeiten. Wegen seiner grundsätzlichen Eignung soll das Material also dahingehend modifiziert werden, dass falsch positive Ergebnisse bei Verwendung einer Referenzkörnung auf Basis von Borosilikatglas nicht auftreten (Bild 2.17). Wird die Körnung jedoch in unter Praxisbedingungen AKR-gefährdeten Betonrezepturen eingebaut, so sollen auch im Labor die typischen Symptome wie Dehnung der Probekörper und Abfall des E-Moduls in Folge innerer Schädigung zuverlässig ange-

zeigt werden (richtig positiv). Dabei wird gleichzeitig ein zeitraffender Effekt angestrebt, um eine Rezeptur idealerweise schon nach 28 bis 56 Tagen beurteilen zu können.

Eine Referenzkörnung mit definierter und zuverlässig reproduzierbarer Sensibilität soll bei Forschungsaktivitäten helfen, das Schädigungspotential infolge AKR bei gefährdeten Betonmischungen abzuschätzen.



## 3 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN

### 3.1 SYSTEMATIK

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag auf der Herstellung und Prüfung einer künstlichen Körnung, bei der aus Borosilikatglasmehl im Drehrohrföfen Glasperlen unterschiedlicher Korngrößen gesintert wurden. Im Vergleich zu Borosilikatglasscherben, deren Bruchverhalten kaum kontrollierbar ist, kann so eine gleichmäßige und definierte Oberfläche gestaltet werden. Außerdem ist es möglich, Einfluss auf die Porosität der Körnung zu nehmen.

Neben den Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung sind auch weitere Körnungen wie z.B. Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung oder Quarzglasgranulat hinsichtlich ihrer Eignung getestet worden. Die unterschiedlich reaktiven Körnungen wurden dazu in verschiedenen Mörtelmischungen verwendet, indem sie gegen eine inerte Gesteinskörnung in variierenden Anteilen ausgetauscht wurden. Die daraus hergestellten Probekörper lagerten in einer Nebelkammer und sind in regelmäßigen Zeitabständen hinsichtlich ihres Dehnungspotentials sowie einer möglichen Gefügeschädigung untersucht worden.

### 3.2 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE

#### 3.2.1 ZEMENTE

Da für die Provokation einer AKR im Mörtel oder Beton der Alkali-Gehalt des verwendeten Zementes wesentlich ist, wurden Zemente verschiedener Hersteller mit unterschiedlichem Alkaliäquivalent verwendet (Tabelle 3.1). Zusätzlich zur Bestimmung des Alkaliäquivalents nach DIN EN 196-21, bei dem der gesamte im Zement vorhandene Alkalianteil erfasst wird, wurden zusätzlich die schnell löslichen und damit sofort zur Verfügung stehenden Alkalien ermittelt. Dazu wurden 0,1 g Zement in 70 ml Wasser suspendiert, 10 min über Kopf geschüttelt, die Suspension anschließend filtriert und das Filtrat mittels Atomabsorptionsspektroskopie analysiert. Die so ermittelten Gehalte an löslichen Alkalien und das daraus (analog zum  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$ , vgl. Abschnitt 2.2.2) berechnete lösliche Alkaliäquivalent ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq/lösl}}$ ) sind ebenfalls in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Der Vergleich des Gesamtalkaligehaltes mit dem Anteil an sofort löslichen Alkalien ergab, dass im Falle des alkalireichen Zementes Z-H ca. 60 %, bei Z-V mit mittlerem Alkaligehalt ca. 76 % und beim alkaliarmen Z-S nur ca. 48 % der insgesamt verfügbaren Alkalien sofort in Lösung gingen und als Reaktionspartner für eine mögliche AKR unmittelbar zur Verfügung standen. Der Rest der Alkalien war daher sehr wahrschein-

lich in den Klinkerphasen gebunden und dürfte erst mit deren fortschreitender Hydratation verfügbar werden.

*Tabelle 3.1: Übersicht der verwendeten Zemente und deren Gehalte an Alkalien*

Zement	Festigkeitsklasse	<u>Gesamtalkaligehalt</u>			<u>sofort lösliche Alkalien</u>		
		Na <sub>2</sub> O [%]	K <sub>2</sub> O [%]	Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> [%]	Na <sub>2</sub> O [%]	K <sub>2</sub> O [%]	Na <sub>2</sub> O <sub>äq/lösl</sub> [%]
Z-H	32,5	0,28	1,47	1,24	0,19	0,85	0,75
Z-V	32,5	0,17	0,94	0,79	0,08	0,79	0,60
Z-S	52,5	0,30	0,37	0,54	0,09	0,24	0,26

Ggf. wurde als Anmachflüssigkeit für die Zemente K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>- bzw. NaOH-Lösung unterschiedlicher Konzentration verwendet, um den Anteil an Alkalien gezielt zu erhöhen.

### 3.2.2 INERTE GESTEINSKÖRNUNG

Als inerte Gesteinskörnung wurde zur Herstellung der Probekörper Normsand der Fraktion 0/2 mm verwendet.

### 3.2.3 EIII-GESTEINSKÖRNUNG

Um die grundsätzliche Eignung der einzelnen Methoden zur Untersuchung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion nachweisen zu können, wurden Referenzproben mit einer natürlich alkaliempfindlichen Gesteinskörnung hergestellt. Diese wurde von der (ehemaligen) Materialprüfanstalt Eckernförde (jetzt MPA Kiel) bezogen.

Es handelt sich dabei um eine EIII-Gesteinskörnung der Korngröße 2/8 mm, die Opalsandstein und Flint enthält.

### 3.2.4 BOROSILIKATGLASPERLEN AUS EIGENHERSTELLUNG

#### 3.2.4.1 HERSTELLUNG

Für die Herstellung der Borosilikatglasperlen wurde Borosilikatglasmehl auf einem Pelletierteller zu Granalien verschiedener Korngröße (1 bis 8 mm) verarbeitet, die anschließend in einem Drehrohrföfen gesintert wurden.

Lieferant des Ausgangsmaterials (Mahlfeinheit 95 % ≤ 63 µm) war das Mineralwerk Thüringen GmbH (Steinach), die chemische Zusammensetzung lt. Herstellerangaben ist Tabelle 3.2 zu entnehmen:

**Tabelle 3.2:** Chemische Zusammensetzung des Borosilikatglasmehls lt. Herstellerangaben

Chemische Verbindung	Anteil in M.-%
SiO <sub>2</sub>	80
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13
Na <sub>2</sub> O	4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
K <sub>2</sub> O	1

Granuliert wurde in einem Granuliermischer (Pflugschärmischer) der Fa. Lödige. Die Herstellung der Glasperlen erfolgte chargenweise, wobei sich die Chargengröße aus der Dimension des verwendeten Granuliermischers ergab.

Je Charge wurden:

- 40,85 kg Borosilikatglasmehl,
- 0,85 kg Stärke und
- ca. 8 l Wasser

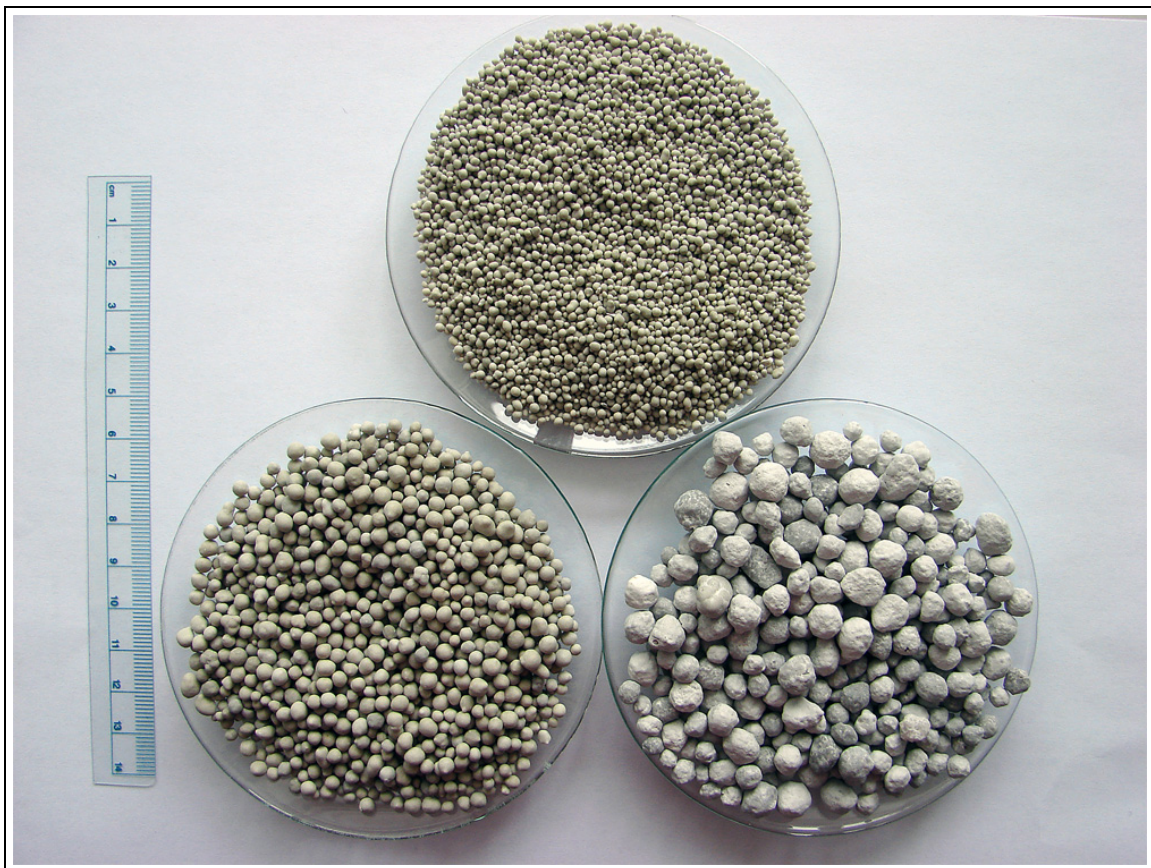
verwendet.

Zunächst wurde das Wasser mit der Stärke vermischt und kräftig gerührt. Nach dem Ansteifen der Mischung wurde der Ansatz abermals gründlich durchgerührt. Anschließend wurde das Glasmehl in den Mischer gegeben, mit der Stärke-Wasser-Mischung versetzt und 2 min homogenisiert. In Abhängigkeit von Mischdauer (mehrere Zyklen zu je 1 bis 2 min) und zugesetzter Wassermenge bestimmte sich die Korngröße der Granalien. Je feuchter die Mischung im Granuliermischer, desto größere Korndurchmesser der Pellets stellten sich ein. Allerdings musste die Wassermenge je Charge leicht variiert werden, da sich die Temperatur im Mischer erhöhte. Die Mischdauer betrug im Durchschnitt 6 min.

Zum Ende des Granuliertvorganges sind die Granalien mit Glasmehl überpudert worden, um einer Agglomeration vorzubeugen. Anschließend wurde das Grüngranulat über eine Aufgaberinne an das obere Ende eines Drehrohrofens überführt, wo es durch gleichmäßige Rüttelbewegungen langsam in den Ofen einlief und bei 350 °C getrocknet wurde. Nach dem Trockenvorgang wurde das Grüngranulat mittels Siebung fraktioniert (1/2 mm, 2/4 mm und 4/8 mm) und Ober- und Überkorn abgetrennt.

Die einzelnen Kornfraktionen wurden nach dem Trocknen bei 1000 °C im Drehrohrofen gesintert. Auch hier erfolgte die Aufgabe der Pellets über eine Rinne. Bevor diese in den Ofen einliefen, wurden sie mit Kaolinpulver bestäubt, um ein Verkleben während des Sinterns zu vermeiden.

Da das Sintern der Glasperlen mit einer Volumenabnahme verbunden ist, wurden diese nach dem Vorgang erneut gesiebt sowie fraktioniert (Bild 3.1). Anschließend wurden die Glasperlen noch gewaschen, um das anhaftende Kaolin von den Oberflächen zu entfernen, und bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.



**Bild 3.1:** Borosilikatglasperlen nach der Sinterung in den Fraktionen 1/2 mm, 2/4 mm und 4/8 mm

#### 3.2.4.2 EIGENSCHAFTEN

Die fertig gesinterten Glasperlen haben eine überwiegend kugelige Form und eine buckelige Oberfläche (dies betrifft insbesondere die Fraktion 4/8 mm), in welcher mikroskopisch keine Risse erkennbar sind.

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie wurden die einzelnen Fraktionen hinsichtlich ihrer Porosität analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind Tabelle 3.3 zu entnehmen.

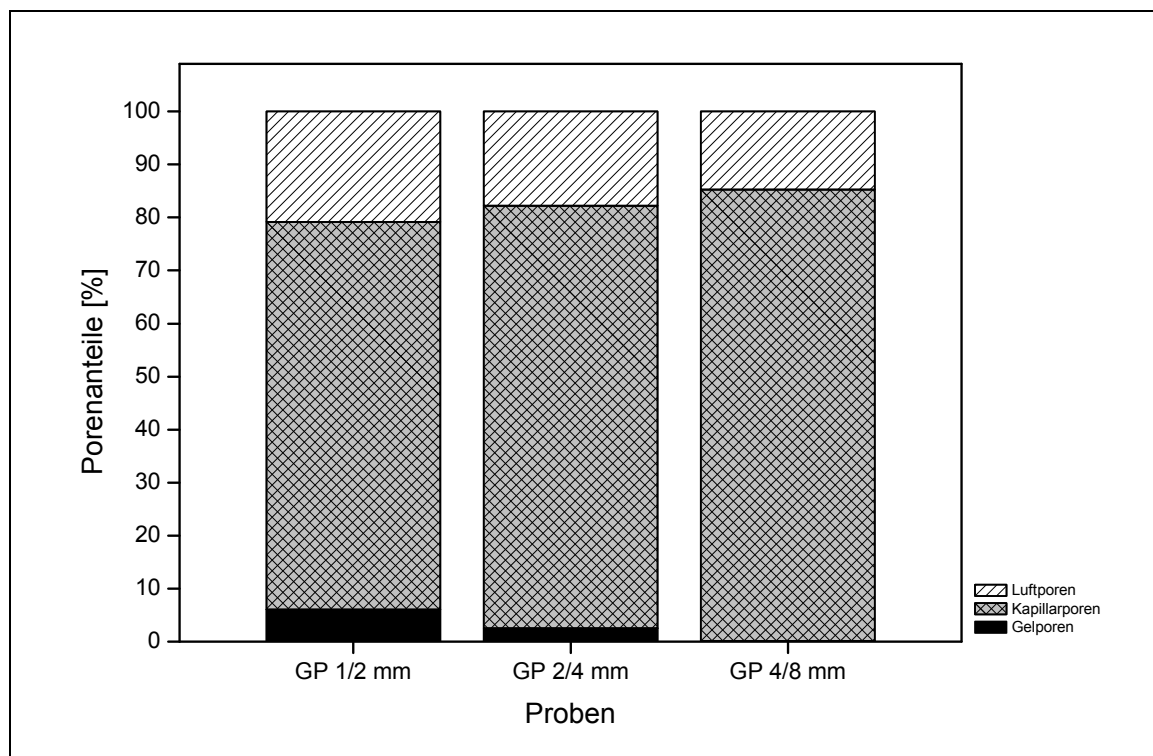
**Tabelle 3.3:** Mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmte Dichte und Porosität der Glasperlenfraktionen 1/2, 2/4 und 4/8 mm

Fraktion	1/2 mm	2/4 mm	4/8 mm
Rohdichte	2,15 g/cm <sup>3</sup>	2,12 g/cm <sup>3</sup>	1,81 g/cm <sup>3</sup>
Gesamtporosität	3,8 %	5,2 %	17,1 %

Grundsätzlich gilt für alle Fraktionen: Je kleiner die Körnung, desto größer ist deren Rohdichte. Die Porosität nimmt also mit zunehmender Korngröße zu, wobei sie bei den Körnungen 1/2 und 2/4 mm mit 3,8 bzw. 5,2 % deutlich geringer ausfällt als bei der Fraktion 4/8 mm mit 17,1 %. Auf diesen Aspekt wird im Folgenden noch näher eingegangen.

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie lässt sich die Porenradienverteilung mineralischer Baustoffe ermitteln. Da Quecksilber nur unter äußerem Druck in poröse Stoffe eindringt, kann das eingepresste Quecksilbervolumen unter Annahme eines Porenmodells als Funktion des Porenradius aufgetragen werden. Dabei ist zu beachten, dass dies nur für die offene Porosität gilt. Die Porenradienverteilung mit der jeweiligen Porensummenkurve ist für die einzelnen Kornfraktionen der Glasperlen sowie für die separierte poröse und dichte Körnung im Anhang enthalten (Bild 7.1 bis 7.5).

Außerdem lassen sich mit der Quecksilberdruckporosimetrie die Rein- und die Rohdichte der Probe bestimmen, so dass daraus die Gesamtporosität berechnet werden kann. Nachfolgend gibt Bild 3.2 einen Überblick über die relativen Porenanteile der drei Fraktionen, wobei nach Gel-, Kapillar- und Luftporen unterschieden wird. Als Gelporen gelten dabei alle Poren kleiner  $0,03\ \mu\text{m}$ , Kapillarporen geben den Bereich von  $0,03$  bis  $10\ \mu\text{m}$  wieder und als Luftporen werden alle Poren mit Radien größer  $10\ \mu\text{m}$  definiert. Eine scharfe Abgrenzung der Gel- und Kapillarporen anhand der Porengröße kann jedoch nur theoretischer Natur sein, denn aufgrund des fließenden Übergangs entspricht z.B. der Porenradius der größeren Gelporen bereits der Porengröße der feineren Kapillarporen.



**Bild 3.2:** Relativer Luft-, Kapillar- und Gelporengehalt für die Fraktionen 1/2, 2/4 und 4/8 mm

Für den relativen Porenanteil der einzelnen Fraktionen gilt, dass der Kapillarporengehalt mit zunehmender Korngröße ansteigt. Bei 1/2 mm liegt dieser bei 73,1 %, bei 2/4 mm bei 79,6 % und bei 4/8 mm bei 85,2 % der Gesamtporosität. Gleichzeitig geht der Anteil an Gel- und Luftporen zurück. Während die Körnung 1/2 mm 6,1 % relativen Gelporenanteil aufweist, liegt dieser bei 2/4 mm bei 2,6 % und bei 4/8 mm nur noch bei 0,1 %.

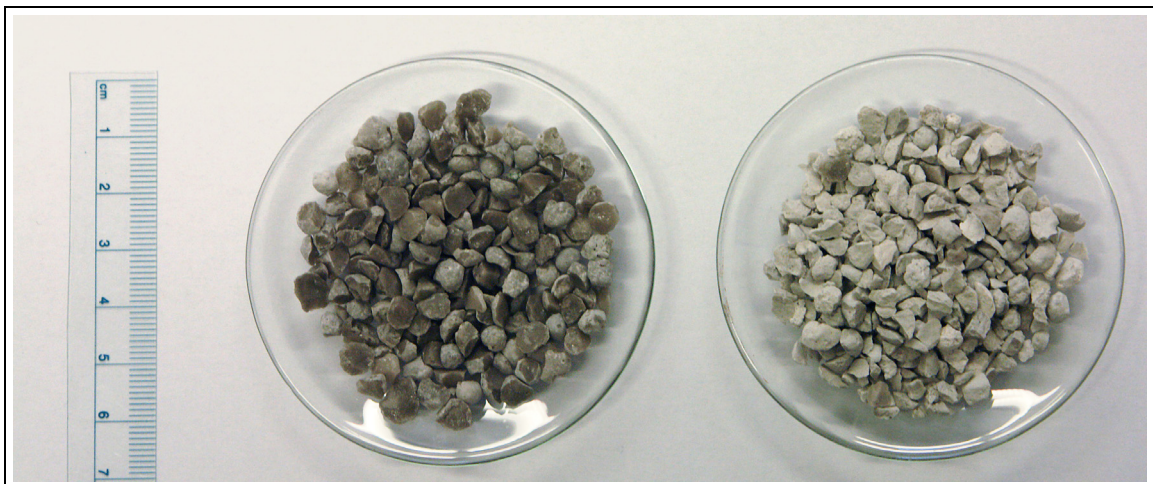


Die Ursache dieses Effektes ist im Sinterverhalten der unterschiedlichen Körnungen zu sehen, denn je kleiner der Korndurchmesser, desto mehr erhitzen sich diese beim Durchgang durch den Drehrohrofen und desto vollständiger können diese versintern, was in einer höheren Rohdichte zum Ausdruck kommt.

Für die Herstellung von Probekörpern wurden die Borosilikatglasperlen hauptsächlich in ihrer ursprünglichen Form verwendet. Wie die gesteigerte Porosität der Fraktion 4/8 mm jedoch schon vermuten lässt, stellte sich heraus, dass die Glasperlen nicht einheitlich sind, sondern in ihrer Porosität Schwankungen aufweisen.

#### 3.2.4.3 SEPARIERUNG DICHT/PORÖS

Um den Einfluss der Porosität zu untersuchen, wurden die Glasperlen der Fraktion 4/8 mm nach in Augenscheinnahme hinsichtlich ihrer Dichte separiert, anschließend gebrochen und mittels Siebung in die Korngruppe 2/4 mm fraktioniert. Dieses gebrochene dichte bzw. poröse Granulat (siehe Bild 3.3) wurde ebenfalls in einzelnen Probekörpern verarbeitet.



**Bild 3.3:** Dichtes (links) und poröses Granulat aus Glasperlenfraktion 4/8 mm

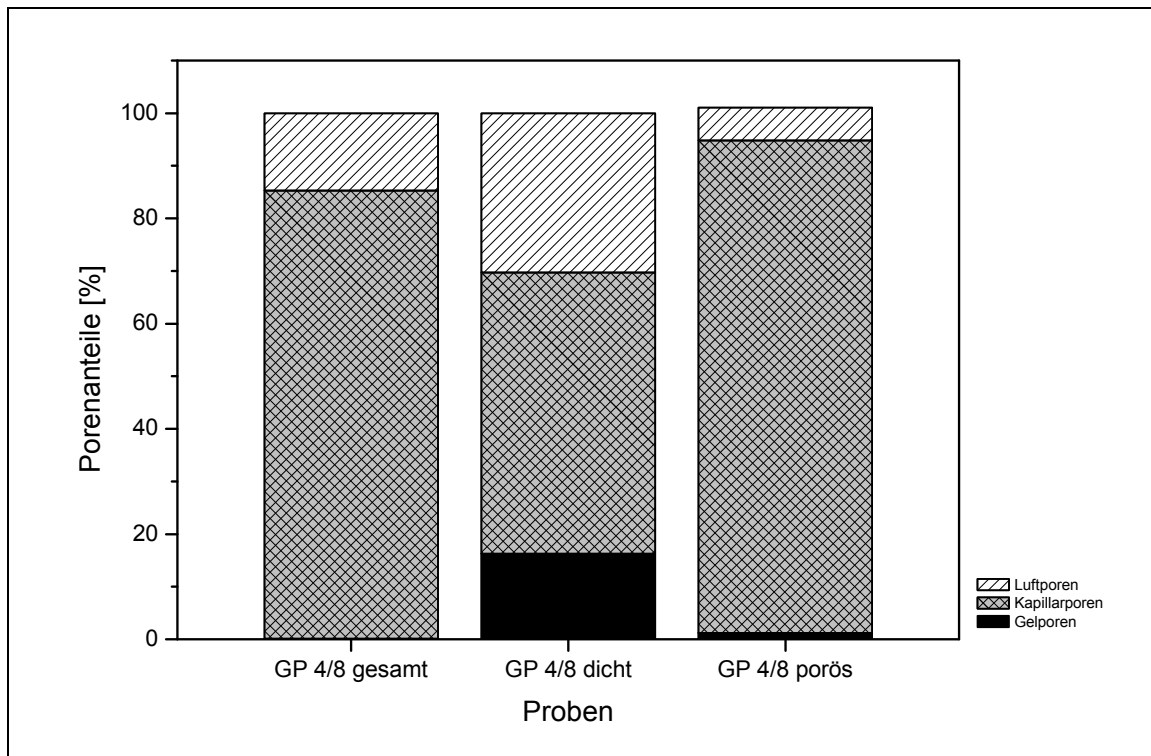
Augenscheinlich unterschieden sich das dichte und das poröse Material dahingehend, dass letzteres deutlich heller ausfällt und die Bruchflächen matt und offenporig erscheinen, während das dichte Granulat von dunkelgrauer Farbe ist und die Bruchflächen ein glänzendes und glasiges Aussehen aufweisen.

Beide Granulate wurden ebenfalls mittels Quecksilberdruckporosimetrie untersucht, die Ergebnisse sind der nachfolgenden Tabelle 3.4 zu entnehmen.

**Tabelle 3.4:** Mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmte Dichte und Porosität der Glasperlenfraktion 4/8 mm gesamt sowie dicht und porös

Fraktion	4/8 gesamt	4/8 dicht	4/8 porös
Rohdichte	1,81 g/cm <sup>3</sup>	1,99 g/cm <sup>3</sup>	1,79 g/cm <sup>3</sup>
Gesamtporosität	17,1 %	5,1 %	19,2 %

Wie nach der augenscheinlichen Beurteilung zu erwarten, unterscheiden sich das dichte und das poröse Granulat deutlich in ihrer Gesamtporosität, die beim porösen Material mit 19,2 % fast viermal so hoch ist wie bei der dichten Körnung mit 5,1 %. In Bild 3.4 sind die relativen Porenanteile der gebrochenen dichten und porösen Körnung im Vergleich zur Gesamtfraktion wiedergegeben.



**Bild 3.4:** Relativer Luft-, Kapillar- und Gelporengehalt für die Fraktionen 4/8 gesamt sowie 4/8 dicht und 4/8 porös

Wie schon aus der Analyse der einzelnen Fraktionen hervorgegangen ist, so weist auch hier das Material mit der höheren Rohdichte gegenüber dem Granulat mit der geringeren Rohdichte einen höheren Anteil Gelporen und einen verringerten Kapillarporengehalt auf. Betrachtet man die Gelporengehalte der Einzelfraktionen, müsste der gewichtete Anteil an Gelporen der Gesamtkörnung eigentlich höher als 0,1 % ausfallen. Es handelt sich jeweils um Einzelmessungen, die also eher Tendenzen wiedergeben.

Versucht man die Werte des dichten und des porösen Granulates zu mitteln, um die Verteilung der gesamten Körnung abbilden zu können, so muss in jedem Fall der Anteil poröser Körner deutlich überwiegen. Augenscheinlich dürfte das Verhältnis poröser zu dichter Körnung bei ca. 2:1 liegen. Anhand der Messwerte kann man diese Verteilung nicht exakt auf die Gesamtkörnung übertragen, was daran liegt, dass bei der Separierung nach dichten und porösen Körnern keine repräsentativen Proben genommen, sondern nur die Extreme aussortiert wurden.

Warum sich in der Fraktion 4/8 mm Körner gleicher Größe in ihrer Porosität derart unterscheiden, bleibt spekulativ. Möglicherweise war der Befüllungsgrad des Drehrohr-

ofens zu hoch, so dass nicht alle Körner direkten und ausreichenden Kontakt zur Ofenwand hatten und deshalb ein großer Teil der Granalien nicht vollständig sintern konnte.

Es ist davon auszugehen, dass diese Inhomogenitäten auch die Fraktionen 1/2 und 2/4 mm betreffen, wenn auch nicht so ausgeprägt wie bei Körnung 4/8 mm. Bei den kleineren Korngrößen war eine Separierung und nachfolgende differenzierte Untersuchung jedenfalls nicht möglich.

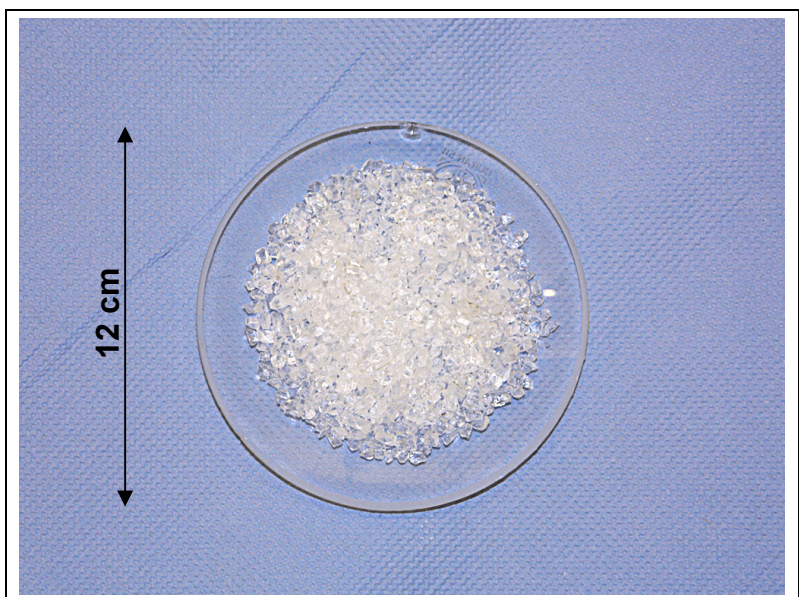
### 3.2.5 BOROSILIKATGLASGRANULAT

Als Vergleichsmaterial kamen Borosilikatglasscherben zum Einsatz. Diese gelten derzeit als das Standardmaterial für den Nachweis einer AKR. Das Granulat der Körnung 2/4 mm wurde von der Fa. GVB (Aachen) bezogen. Die Rohdichte des Granulates wurde mit  $2,23 \text{ g/cm}^3$  ermittelt, die Porosität liegt bei 0,19 %. Die chemische Zusammensetzung laut Herstellerangaben ist Tabelle 3.4 zu entnehmen.

*Tabelle 3.4: Chemische Zusammensetzung Borosilikatglasgranulat*

Chemische Verbindung	Anteil in M-%
$\text{SiO}_2$	80,6
$\text{B}_2\text{O}_3$	13,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,4
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	4,0

Bei diesem Glasbruch handelt es sich laut Hersteller um ein Granulat mit verhältnismäßig kubischen Partikeln (Bild 3.5), welches mittels eines speziellen Bruchverfahrens gewonnen worden sein soll, über das der Hersteller keine Angaben machen wollte. Herkömmliche Borosilikatglasscherben weisen dagegen eine eher splitterige Gestalt auf.



*Bild 3.5: Borosilikatglasgranulat 2/4 mm*

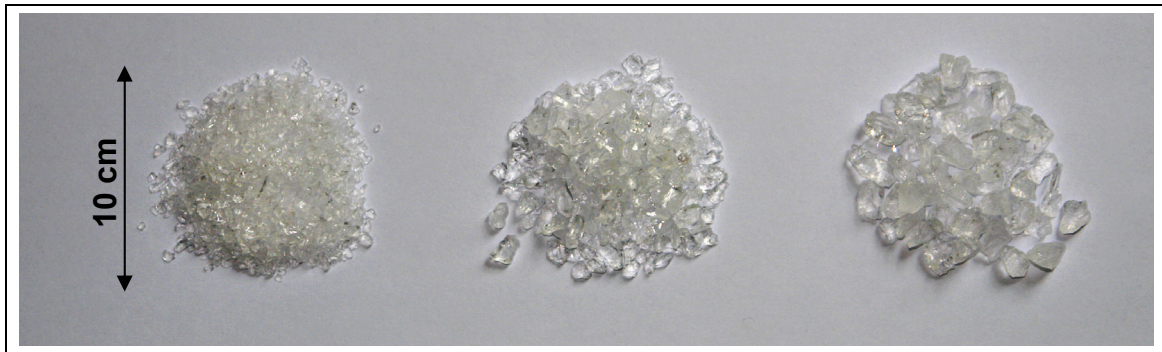


### 3.2.6 QUARZGLASGRANULAT

Da für den Ablauf einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion lediglich das in einer Körnung enthaltene amorphe  $\text{SiO}_2$  als Reaktionspartner für die Alkalien wirksam ist, wurde auch reines Quarzglas (in Form von Granulat) hinsichtlich seiner Eignung für den Nachweis einer AKR getestet.

Das Quarzglasgranulat wurde aus defekten Quarzglasziegeln der Fa. Momentive Performance Materials (Geesthacht) gewonnen. Quarzglasziegel werden für die Produktion von Siliziumeinkristallen genutzt, aus welchen Wafer für die Chip-Herstellung erzeugt werden. Diese Quarzglasziegel zeichnen sich durch eine sehr hohe Reinheit des Materials aus, welches praktisch keine Verunreinigungen enthält (metallische Gesamtkontamination liegt bei ca. 20 ppm) und daher zu nahezu 100 % aus amorphem  $\text{SiO}_2$  besteht.

Herstellungsbedingt weist das Glas z.T. eingeschlossene Luftbläschen auf. Es handelt sich dabei jedoch um eine geschlossene Porosität, so dass Alkalien nur an der Oberfläche angreifen können und nicht ins Innere geleitet werden.



**Bild 3.6:** Quarzglasgranulat der Fraktionen 1/2, 2/4 und 4/8 mm

Für die Herstellung des Granulates wurden die Quarzglasziegel zunächst in grobe Scherben gebrochen, die dann im Backenbrecher weiter zerkleinert wurden. Das so entstandene Granulat wurde mittels Siebung klassiert und in den Fraktionen 1/2, 2/4 und 4/8 mm im Mörtel verwendet. Ähnlich wie beim Borosilikatglasgranulat sind die Partikel eher nicht splitterig, sondern weisen eine kubische Gestalt auf.

### 3.2.7 BOROSILIKATGLASPERLEN AUS INDUSTRIELLER HERSTELLUNG

Während Glaskugeln aus herkömmlichen Kalk-Natron-Glas gut zu beschaffen sind, sind Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung am Markt kaum zu finden und mit hohen Kosten verbunden. Die Firma Hilgenberg GmbH (Malsfeld) bietet Borosilikatglasperlen der Korngröße 2 bis 30 mm mit folgender chemischer Zusammensetzung (Tabelle 3.5) an:

**Tabelle 3.5:** Chemische Zusammensetzung der Borosilikatglasperlen lt. Herstellerangaben

Chemische Verbindung	Anteil in M-%
SiO <sub>2</sub>	81,20
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,30
Na <sub>2</sub> O	3,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,34
K <sub>2</sub> O	0,85

Gegenüber dem Borosilikatglasmehl, welches für die gesinterten Glasperlen verwendet wurde, fällt der SiO<sub>2</sub>-Gehalt bei den Kugeln aus industrieller Herstellung zwar geringfügig höher und der Gehalt an Na<sub>2</sub>O etwas niedriger aus, dennoch sind die jeweiligen Zusammensetzungen sehr ähnlich und daher gut vergleichbar.

Für die Versuche wurden Borosilikatglasperlen (Rohdichte 2,23 g/cm<sup>3</sup>) der Korngröße 3 mm verwendet. Diese sind praktisch porenfrei gesintert (Porosität 0,18 %) und weisen aufgrund ihrer mechanischen Nachbearbeitung eine matte Oberfläche auf.

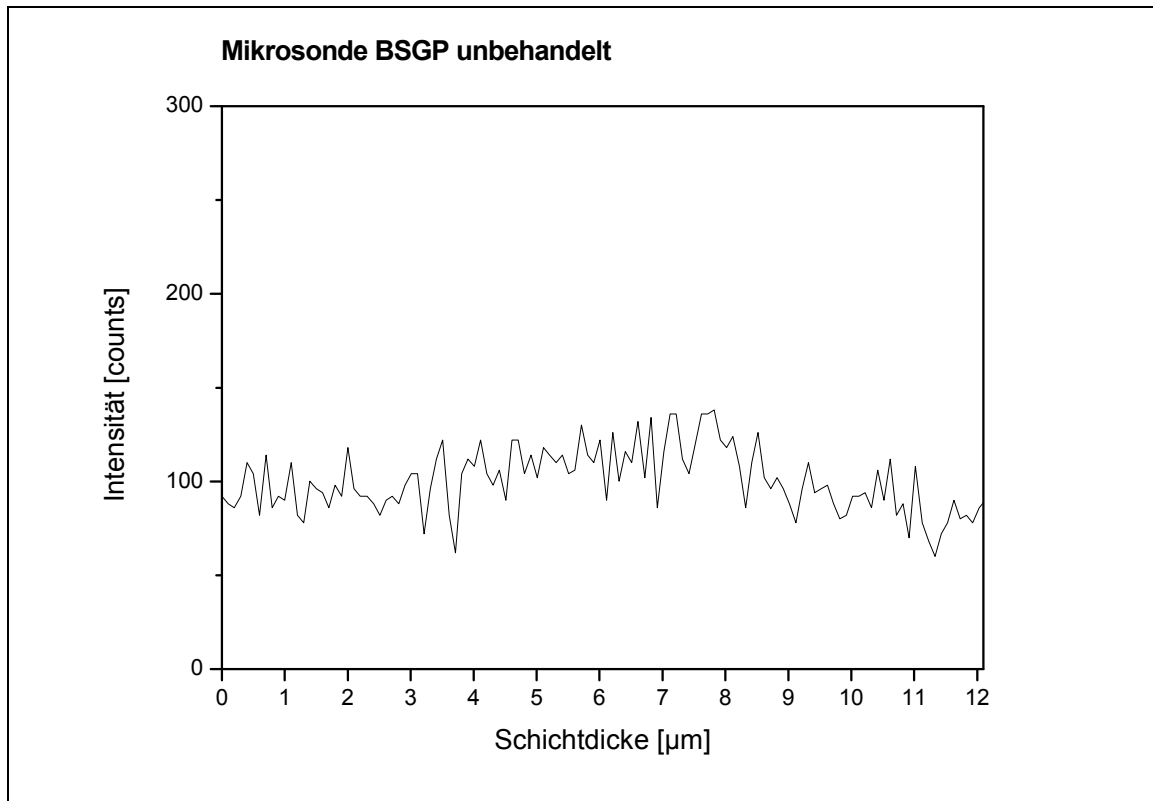
Da sich Borosilikatglasscherben als überempfindlich erwiesen haben, wurde außerdem nach einer Möglichkeit gesucht, die Reaktivität der Glasperlen zu beeinflussen, diese also herabsetzen zu können, falls dies nötig sein sollte. Daher wurden die Glaskugeln sowohl im ursprünglichen Zustand als auch mit geätzter Oberfläche in den Probekörpern verwendet. Borosilikatglas ist chemisch sehr beständig, weshalb es auch zur Herstellung von Laborgläsern und –gefäßen verwendet wird. Die Oberflächenätzung erfolgte daher mit 5%iger Flusssäure, die über eine Dauer von 20 min einwirkte. Flusssäure greift das Glas dahingehend an, dass sie seine Hauptkomponente, das SiO<sub>2</sub>, in Lösung bringt:



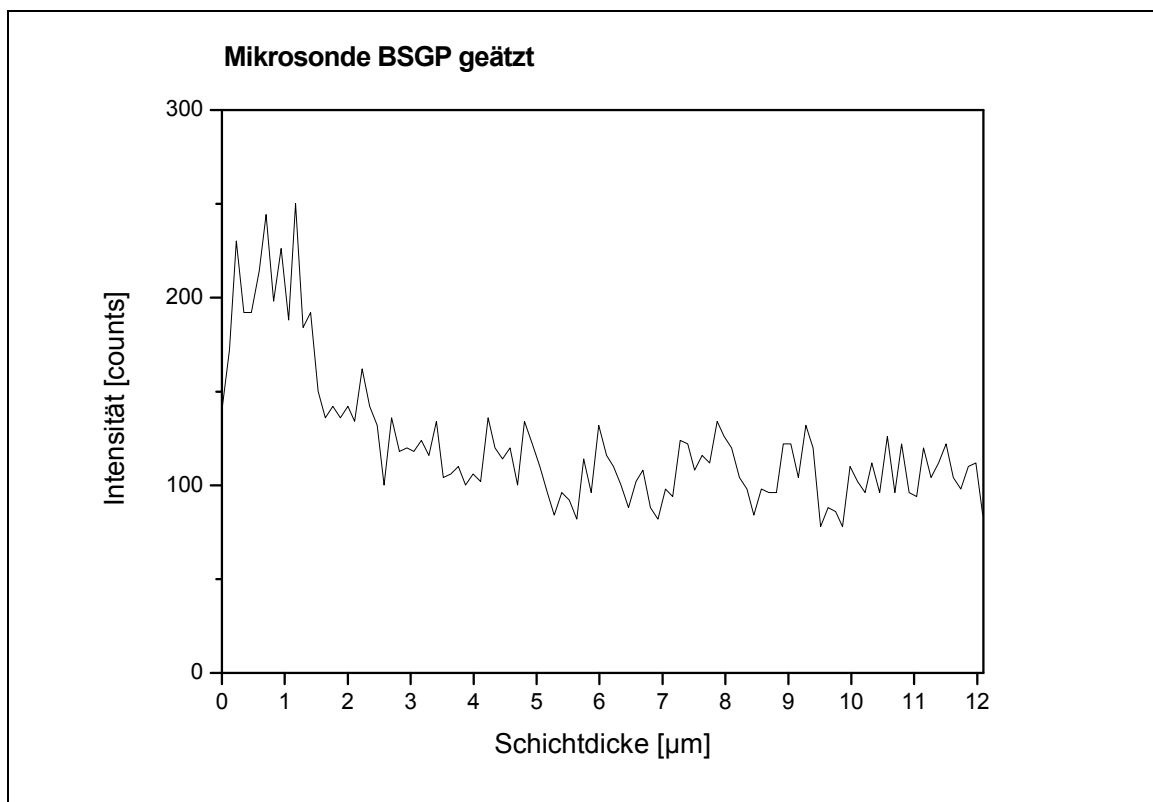
Die Reaktionsgleichung gibt den Angriff durch Flusssäure allerdings nur stark vereinfacht wieder, denn in der Praxis lagern sich die Reaktionsprodukte an der Oberfläche ab und beeinflussen damit den weiteren Verlauf des Ätzens [Scho88].

Zum Vergleich der unbehandelten mit der geätzten Probe wurde eine Elektronenstrahl-Mikrosonden-Untersuchung durchgeführt. Damit können chemische Elemente ab der Ordnungszahl 5 (Bor) qualitativ und quantitativ nachgewiesen werden. Chemische Zonierungen in Feststoffen lassen sich so im Bereich von wenigen µm bestimmen. Die Untersuchungsergebnisse für Bor in der Oberflächenschicht der unbehandelten und der geätzten Probe sind in Bild 3.7 und in Bild 3.8 wiedergegeben.

Während bei der unbehandelten Probe die Intensität des Bors von der Glasperlenoberfläche nach innen gleichbleibend verteilt ist, ergibt sich bei der geätzten Probe eine gesteigerte Intensität des Bors über die ersten 2 µm an der Oberfläche, fällt dann leicht ab und verläuft nach insgesamt 3 µm wieder auf gleich bleibendem Level. Durch die Ätzung reichern sich also Borat-Verbindungen an der Glasperlenoberfläche an.

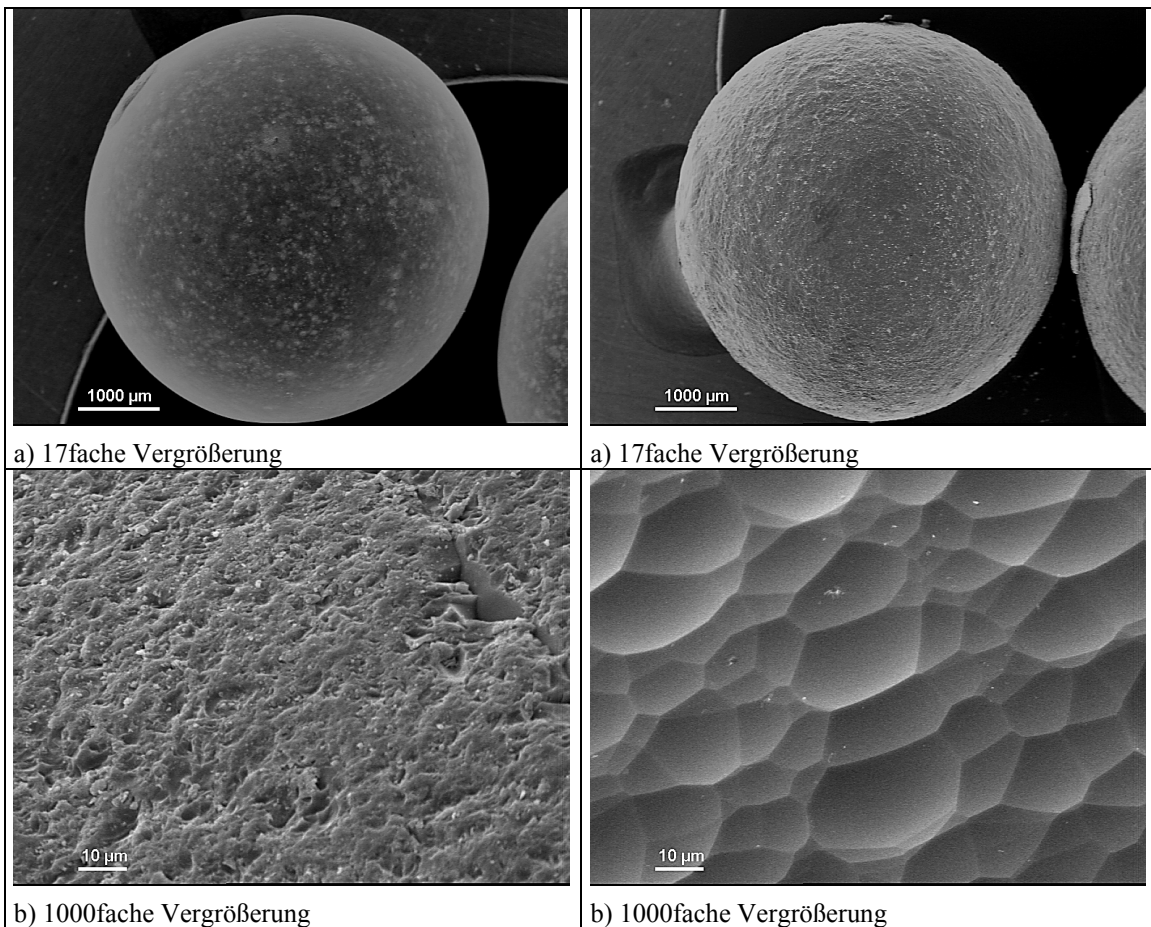


**Bild 3.7:** Mikrosondenanalyse für Bor der unbehandelten Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung



**Bild 3.8:** Mikrosondenanalyse für Bor der mit HF geätzten Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung

In Bild 3.9 und Bild 3.10, die mittels Rasterelektronenmikroskopie entstanden sind, werden die Unterschiede zwischen BSGP mit unbehandelter und geätzter Oberfläche deutlich.



**Bild 3.9:** REM-Aufnahme Borosilikatglasperle unbehandelt

**Bild 3.10:** REM-Aufnahme Borosilikatglasperle geätzt

Bei der Ätzung wird Material oberflächlich abgetragen, die so behandelten Glasperlen weisen die sogenannte „Golfballoberfläche“ (dellenförmige Einbuchtungen) auf, die typisch ist für eine Ätzung.

### 3.3 HERSTELLUNG UND LAGERUNG DER PROBEKÖRPER

Da die künstlichen Körnungen z. T. knapp waren, wurden aus Gründen der Materialeinsparung ausschließlich Mörtelprismen ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) für die Untersuchung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion hergestellt.

### 3.3.1 PROBEKÖRPER FÜR MÖRTELSCHNELLTEST

Um die grundsätzliche Empfindlichkeit der verwendeten Körnungen gegenüber Alkalien zu testen, wurden diese zunächst in Anlehnung an den modifizierten Mörtelschnelltest nach FIB geprüft.

Von der zu prüfenden Körnung wurden 900 g der Fraktion 1/2 mm eingewogen und mit 450 g nachgewiesenen alkaliunempfindlichem Quarzsand (Normsand) homogenisiert. Die Herstellung der 3 Mörtelprismen je Mischung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196-1 unter Verwendung von 450 g eines alkalireichen Portlandzementes (Z-H). Das Anmachwasser wurde mit NaOH beaufschlagt, um ein  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 2,5 M.-% einzustellen. Somit war sichergestellt, dass bereits zu Beginn der Hydratation ein gleichmäßig hohes und homogen verteiltes Alkaliangebot im Mörtel vorhanden ist. Zur Herstellung des Mörtels wurden 225 g der NaOH-Lösung verwendet; dies entspricht einem w/z von 0,5.

Nach der Herstellung verblieben die Prismen 24 Stunden abgedeckt in der Form und wurden bei 20 °C und > 95 % rel. Luftfeuchte gelagert. Nach der Ausformung sind die Ausgangswerte (Nullmessung) für Masse und Dehnung bestimmt worden. Danach wurden die Prismen in einem Exsikkator über Wasserbad bei 70 °C für 28 Tage eingelagert. Die Messwertaufnahme für Masse und Dehnung erfolgte am 14., 21. und 28. Tag, nachdem die Probekörper auf 20 °C temperiert wurden. Der angegebene Messwert ist das Mittel aus den Einzelwerten von 3 untersuchten Probekörpern.

Durch das hohe Alkaliangebot sowie die hohen Lagerungstemperaturen von 70 °C tritt eine AKR stark beschleunigt auf und es lässt sich bereits nach 28 Tagen eine Prognose aufstellen, ob die verwendete Körnung alkaliempfindlich ist oder nicht. Überschreiten die Probekörper eine Dehnung von 2 mm/m gilt die Körnung als alkalireaktiv. Beträgt die Dehnung zwischen 1,5 und 2 mm/m ist die Körnung als potentiell alkalireaktiv einzustufen. Nur Dehnungen kleiner 1,5 mm/m weisen eine Körnung als ausreichend alkaliunempfindlich aus. Da dieses Verfahren sehr „scharf“ ist, sind auch falsch positive Einstufungen möglich, d.h. ein als reaktiv eingestuftes Material zeigt unter Praxisbedingungen möglicherweise keine Reaktion hinsichtlich AKR.

### 3.3.2 PROBEKÖRPER FÜR KLIMALAGERUNG

Nach der ersten Einstufung der unterschiedlichen Körnungen mittels Mörtelschnelltest wurden Probekörper für die Klimalagerung angefertigt. Um das jeweilig vorhandene Alkaliangebot zu variieren, kamen sowohl verschiedene Zemente (siehe Abschnitt 3.2.1, S.33) als auch unterschiedliche Mengen an Zement (zwischen 500 und 800 kg/m<sup>3</sup> Mörtel) zum Einsatz. Ggf. wurden dem Anmachwasser zusätzlich Alkalien (in Form von  $\text{K}_2\text{SO}_4$  bzw. NaOH) zugesetzt, um das Alkaliangebot noch zu steigern. Das Verhältnis von Wasser zu Zement (w/z) wurde zwischen 0,45 und 0,5 eingestellt.

Um das Reaktionspotential hinsichtlich AKR der verschiedenen Körnungen festzustellen, wurden diese in unterschiedlichen Anteilen gegen die inerte Gesteinskörnung ausgetauscht. Wegen der z. T. unterschiedlichen Rohdichten der einzelnen Materialien er-

folgte der Austausch immer bezogen auf den Stoffraum der Mörtelmischung, so dass die Anteile der potentiell reaktiven Körnungen stets in Vol.-% (bezogen auf die Gesamtmenge des Zuschlags) angegeben sind.

Die Herstellung der Mörtelprismen erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196-1. Alle Prismen wurden an den Stirnseiten mit Messzapfen versehen, um deren Dehnungsverhalten untersuchen zu können.

Die Mörtelmischungen verblieben bis 24 Stunden nach Herstellung in der Form (abgedeckt mit einer Glasplatte) und lagerten bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte. Anschließend wurden diese ausgeschalt und einer Nullmessung (Ausgangswerte für Dehnung, Resonanzfrequenz und Masse) unterzogen. Diese und alle folgenden Messwerte sind jeweils Mittelwerte aus 3 Proben derselben Mischung.

Im Anschluss daran wurden die Probekörper in der Nebelkammer (nach Alkali-Richtlinie) eingelagert. Die Temperatur von 40 °C wird über ein beheizbares Wasserbad im Sockel der Kammer eingestellt, während gleichzeitig ein Wasserverdampfer Sprühnebel in die Kammer leitet, um konstant eine rel. Luftfeuchte von 100 % zu gewährleisten. Das Dach der Nebelkammer ist so ausgebildet, dass kein Kondenswasser auf die Proben tropfen kann und so eine Auslaugung weitestgehend vermieden wird.



**Bild 3.11:** Blick in die Nebelkammer



### 3.4 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

#### 3.4.1 DEHNUNGSMESSUNGEN

Ein wesentliches Merkmal einer im Beton oder Mörtel stattfindenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist die Dehnung des Bauteils bzw. des Probekörpers. Bei massigen Probekörpern (Würfel) geht diese Dehnung oftmals mit einer Rissbildung einher. Im Falle der hier verwendeten Mörtelprismen ist eine Rissbildung zwar mitunter zu beobachten, aber auch eine Dehnung allein ist ein guter Indikator für eine AKR.

Um die Dehnung zu erfassen, wurden alle Probekörper an den Stirnseiten mit Messzapfen bestückt, deren Abstand mit Hilfe einer analogen Messuhr (Bild 3.12) regelmäßig und auf 0,0001 mm genau aufgezeichnet wurde. Vor der Erfassung der Messwerte wurden die Probekörper nach Entnahme aus der Klimalagerung auf 20 °C abgekühlt, so dass die thermische Längenänderung in Folge der Lagerung nicht erfasst wurde. Die so festgestellte Längenänderung wurde relativ zur Probenlänge nach Formel 3.1 umgerechnet und in mm/m angegeben.

$$\Delta l = \frac{l_T - l_0}{l_p} \quad (3.2)$$

mit

$\Delta l$	Längenänderung
$l_T$	Messwert zum Zeitpunkt T
$l_0$	erster Messwert 1 d nach Herstellung
$l_p$	Länge des Prismas 1 d nach Herstellung



**Bild 3.12:** Dehnungsmessgerät mit Probekörper

Nach Alkali-Richtlinie werden die als kritisch zu betrachtenden Grenzwerte für das Stattfinden einer AKR mit 0,6 mm/m angegeben. Dieser Grenzwert gilt jedoch für Betonbalken und schließt die thermische und hygrische Dehnung mit ein. Für in der Nebelkammer gelagerte Mörtelprismen ist daher ein Grenzwert von 0,5 mm/m gültig [Spr97]. Wird dieser Wert überschritten, so gilt eine AKR als praktisch nachgewiesen. Alle angegebenen Messwerte sind Mittelwerte aus 3 untersuchten Probekörpern.

### **3.4.2 DRUCKFESTIGKEIT**

Sofern ausreichend Probekörper zur Verfügung standen, wurde die Druckfestigkeit der einzelnen Mörtelprismen nach 28 Tagen bzw. am Ende des Beobachtungszeitraumes bestimmt. Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 196-1.

### **3.4.3 DYNAMISCHER ELASTIZITÄTSMODUL MITTELS LASER-VIBROMETRIE**

Der Elastizitätsmodul, kurz E-Modul genannt, beschreibt den elastischen Verformungswiderstand eines Baustoffs. Er wird ausgedrückt durch das Verhältnis von einwirkender Spannung zu zugehöriger elastischer Formveränderung (Stauchung). Der E-Modul des Betons oder Mörtels wird hauptsächlich bestimmt von den E-Moduln seiner Komponenten Zementsteinmatrix und verwendeter Gesteinskörnung. Dabei nimmt mit wachsendem Anteil der Gesteinskörnung und sinkendem Zementsteingehalt der E-Modul normalerweise zu, da die Spannungen überwiegend von der groben Gesteinskörnung abgetragen werden. Die meisten Einflüsse, die zu einer Steigerung der Druckfestigkeit (z. B. niedriger w/z-Wert, Verwendung von Zement hoher Normfestigkeit, vollständige Frischbetonverdichtung), führen, bedingen auch einen höheren E-Modul [Grü01], so dass Messwerte der Druckfestigkeitsprüfung und Messwerte aus der E-Modulbestimmung korreliert werden können.

Es werden der statische ( $E_{\text{stat}}$ ) und der dynamischen E-Modul ( $E_{\text{dyn}}$ ) unterschieden.  $E_{\text{stat}}$  wird durch eine zerstörende Prüfung nach DIN 1048-5, bei der eine stetig zunehmende oder ruhende Belastung auf den Probekörper aufgebracht wird, ermittelt.  $E_{\text{dyn}}$  beschreibt den Verformungswiderstand bei stoßartiger Belastung und kann auch nichtzerstörend festgestellt werden, indem die Geschwindigkeiten der Schallausbreitung im Material oder Resonanzfrequenzen der Probekörper ausgewertet werden [Grü01, Spri07].

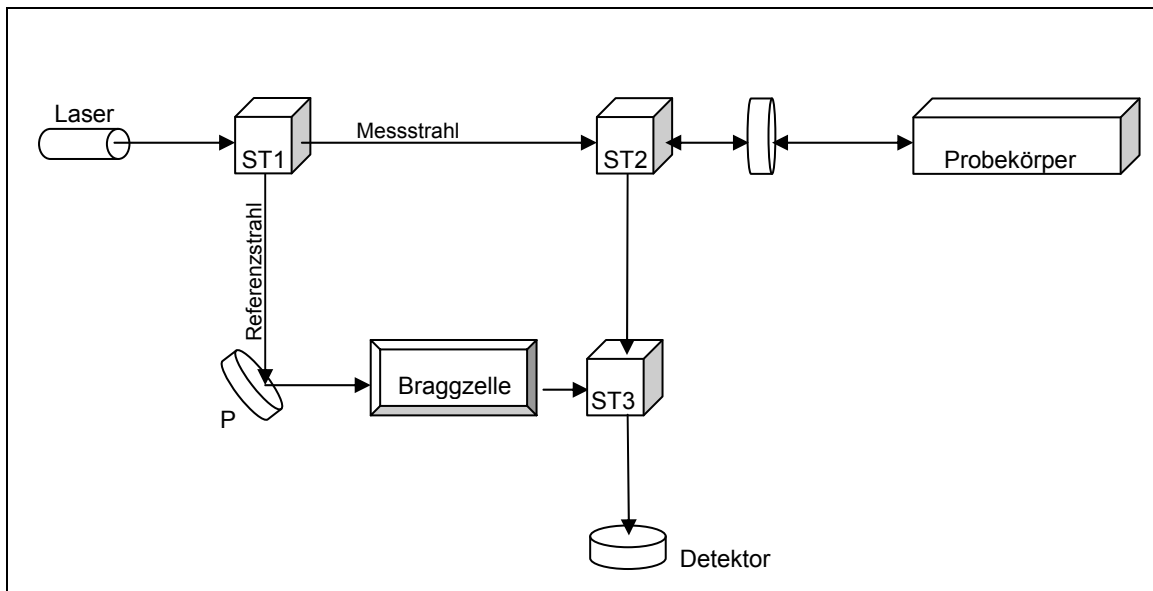
Insbesondere bei Langzeit-Laboruntersuchungen, wie sie bei der Erforschung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion gegeben sind, sind zerstörende Prüfverfahren zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit bzw. des Reaktionsfortschrittes eher unvorteilhaft. Sie gehen mit großem zeitlichen und materiellen Aufwand einher, und es ist nicht möglich, ein und die selbe Probe fortlaufenden Prüfungen zu unterziehen. In der vorliegenden Arbeit wird daher der dynamische E-Modul bestimmt, der aus der Resonanzfrequenzanalyse des Probekörpers abgeleitet wird. Die Analyse der Resonanzfrequenz erfolgt mittels Laser-Vibrometrie. Durch die Anregung mit einem piezoelektrischen Schallgeber werden im Probekörper Schwingung erzeugt, die mit Hilfe eines Laserstrahls abgetastet und anschließend ausgewertet werden können.



Vorteil dieses Verfahrens ist außerdem, dass nicht nur zerstörungsfrei, sondern gegenüber konventionellen Messverfahren (wie Resonanzfrequenzmessgerät der Fa. Labeck) auch berührungslos gemessen werden kann, so dass Messungenauigkeiten wie sie sich zum Beispiel aus der direkten Ankopplung des Schallaufnehmers ergeben, vermieden werden. Die ausführliche Beschreibung der konventionellen Resonanzfrequenzmessung mittels Ankoppelvorrichtung kann z. B. [Erf96] entnommen werden.

#### 3.4.3.1 ALLGEMEINER AUFBAU LASER-VIBROMETER

Im optischen Messkopf des Laser-Vibrometers dient ein sichtbarer Helium-Neon-Laser (Wellenlänge 633 nm) geringer Leistung ( $< 1$  mW, entspricht Laserklasse 2, vergleichbar Laser-Pointer) als Lichtquelle. Der erzeugte Strahl wird im polarisierenden Strahlteiler ST1 in einen Mess- und in einen Referenzstrahl aufgeteilt. Als nächstes durchläuft der Messstrahl einen weiteren Strahlteiler (ST2) und wird mit Hilfe einer Linse ( $\lambda/4$ ) auf das schwingende Objekt fokussiert und von dort zurück gestreut. Der polarisierende Strahlteiler ST2 bildet damit zusammen mit der  $\lambda/4$ -Platte eine optische Weiche, die den zurück gestreuten Messstrahl zum Strahlteiler ST3 ablenkt. Der Referenzstrahl wird über den Umlenkspiegel (P) in eine Bragg-Zelle geleitet, die ein hochfrequentes Träger-signal erzeugt. Referenz- und Messstrahl werden überlagert. Das daraus resultierende Interferenzsignal wird am Fotodetektor in ein elektrisches Signal umgewandelt, welches anschließend im Controller hinsichtlich Laufzeit des Strahles und Frequenz ausgewertet wird [Poly1].



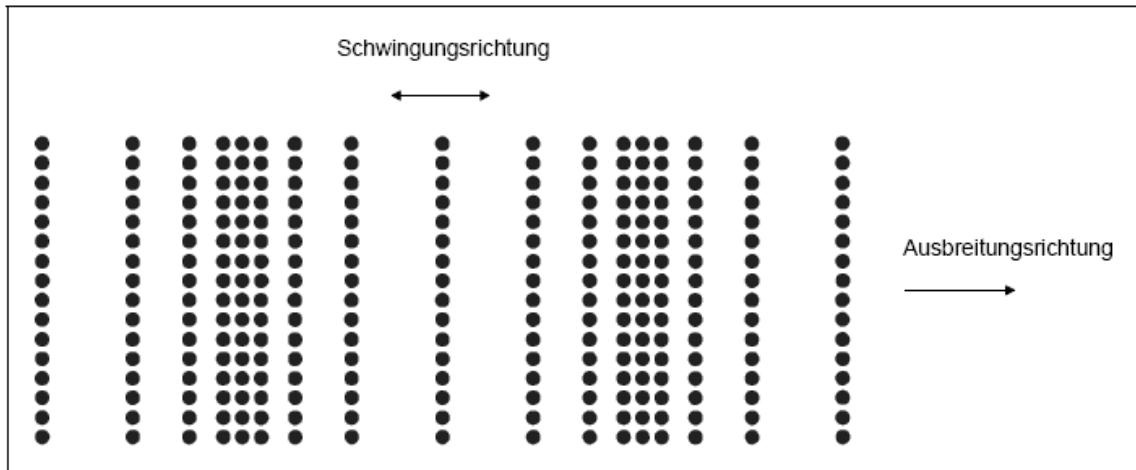
**Bild 3.13:** Schematische Darstellung des Messvorganges im Vibrometer [nach Poly1]

#### 3.4.3.2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Standardwerke zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mittels Schall sind u. a. [Poh65] und [Kra86]. Demnach stellen sich die physikalischen Grundlagen wie folgt dar:

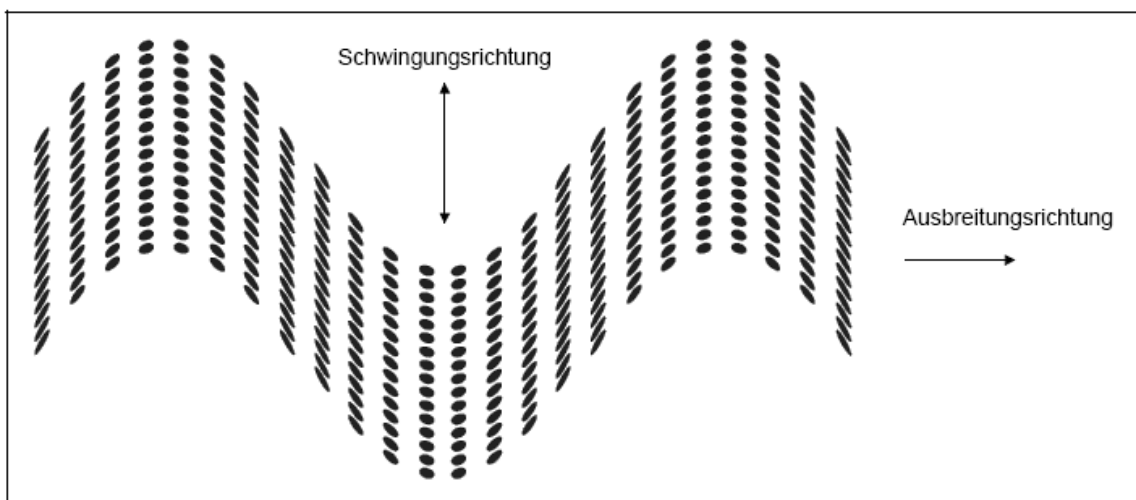
Wird ein elastisches Medium mit Schall angeregt, so treten in diesem Druckstörungen auf, die sich als Welle ausbreiten. Dabei werden die einzelnen Teilchen des Mediums in

Schwingung versetzt, ohne dass diese in der sich fortpflanzenden Welle mitwandern. Schwingen die Teilchen um ihre Ruhelage in Ausbreitungsrichtung der Welle, so spricht man von Längs- oder Longitudinalwellen (Bild 3.14). Das Material, von dem die Welle durchlaufen wird, wird dabei gedehnt bzw. komprimiert. Deshalb wird diese Wellenform auch als Kompressionswelle bezeichnet.



**Bild 3.14:** Teilchenmodell einer Longitudinalwelle nach [Poh65, Kra89]

Die Entstehung von Longitudinalwellen setzt eine unbehinderte Wellenausbreitung im so genannten „unendlich ausgedehnten Medium“ voraus. Eine ungestörte Wellenausbreitung in „unendlich“ ausgedehnten Medien muss jedoch als ein Idealzustand betrachtet werden, denn im endlichen Raum ist eine Längsdehnung immer mit einer Querkontraktion verbunden. Als Sonderform der Longitudinalwelle entsteht deshalb die so genannte Dehnwelle im stabförmigen Medium. Viele Probenkörper (z. B. Bohrkerne, Betonbalken oder Mörtelprismen) in der Baustoffprüfung stellen aufgrund ihrer Geometrie ein stabförmiges Medium dar, so dass die sich ausbildende Dehnwelle zur Analyse genutzt wird.

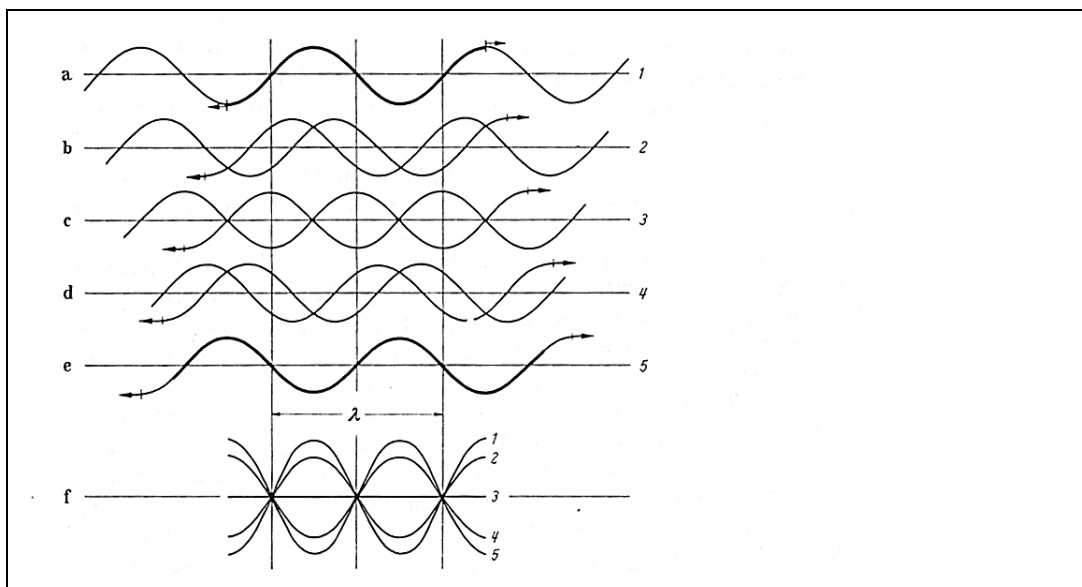


**Bild 3.15:** Teilchenmodell einer Transversalwelle nach [Poh65, Kra86]

Erfolgt die Schwingung der Teilchen quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle, so werden diese als Quer- oder Transversalwellen bezeichnet (Bild 3.15). Das Material wird sozusagen geschert, so dass man auch von der Torsionswelle spricht.

Die im Probekörper angeregten Wellen werden je nach Beschaffenheit der Probe gedämpft und vor allem an den Begrenzungsflächen reflektiert, so dass sich ankommende und rücklaufende Wellen überlagern. Dabei entstehen so genannte stehende Wellen, ein eigentlich paradoxes Gebilde, denn wesentliches Merkmal einer Welle ist deren wandern.

Für Transversalwellen ist die Entstehung einer stehenden Welle in Bild 3.16 dargestellt. In den Bildern a bis e sind die Verbindungslinien der schwingenden Teilchen als Sinuskurve an fünf aufeinander folgenden Zeitpunkten abgebildet, Bild f zeigt die Summenschwungung der stehenden Welle. Bestimmte Teilchen sind dabei dauernd in Ruhe. An diesen Stellen löschen sich die Wellen aus, und man spricht von Schwingungsknoten. Die dazwischen liegenden Bereiche größter Amplitude werden als Schwingungsbäuche bezeichnet. Dabei entspricht der Abstand zweier Schwingungsknoten der halben Wellenlänge  $\lambda$ .



**Bild 3.16:** Entstehung einer stehenden Welle aus zwei Wellen entgegengesetzter Richtung [Kra86]

Ähnlich der Entstehung einer stehenden Transversalwelle erfolgt die einer stehenden Longitudinalwelle, indem hier die Amplituden der Sinusschwingung als Verschiebung der Teilchen in Richtung der Welle bzw. entgegengesetzt dazu aufzufassen sind. In den Knotenebenen liegen dabei die Stellen größter Verdichtung und Verdünnung.

Stehende Wellen werden in einem begrenzten Probekörper in unendlicher Folge erzeugt. Es handelt sich dabei um die Eigenschwingung des Probekörpers, die zugehörigen Frequenzen nennt man Resonanzfrequenzen. Diese werden bei der Resonanzfrequenzmessung bestimmt und sind abhängig von der Probekörpergeometrie, der Dichte und den elastischen Eigenschaften des Materials. Am besten für diese Methode sind

Probekörper geeignet, deren Länge dem 4- bis 6fachen der maximalen Querdimension entspricht, herkömmliche Normprismen lassen sich also gut analysieren.

#### 3.4.3.3 BERECHNUNG VON $E_{\text{DYN}}$ AUS RESONANZFREQUENZ

Je nachdem in welcher Form der Probekörper angeregt wird, bilden sich unterschiedliche Wellenarten aus. In der vorliegenden Arbeit wurden Resonanzfrequenzen aus Dehnwellen ausgewertet. Nur dieses Verfahren soll hier näher betrachtet werden. Für Torsions- oder auch BiegeWellen können die Vorgehensweisen ebenfalls der Literatur [Poh65, Kra86] entnommen werden.

Zur Erzeugung einer Transversal- bzw. Dehnwelle wird der frei liegende Probekörper an der einen Stirnseite mit einem Schallgeber angeregt. An der gegenüberliegenden Stirnseite wird die Schwingung mittels Laserstrahl abgetastet. Es bildet sich eine Grundschiwingung aus, die in Balkenmitte einen Schwingungsknoten und an den Enden Schwingungsbäuche aufweist. Für den dynamischen E-Modul  $E_{\text{dyn}}$  ergibt sich nach [Poh65] in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz  $f_D$  der Längsschiwingung folgender Zusammenhang:

$$E_{\text{dyn}} = \frac{4l^2 \cdot \rho \cdot f_D^2 \cdot K}{n^2} \quad (3.3)$$

mit	l	Länge des Prüfkörpers
	$\rho$	Rohdichte des Prüfkörpers
	$f_D$	Resonanzfrequenz der Schwingung
	K	Korrekturfaktor
	n =	1 (Grundschiwingung)

Gleichung 3.3 enthält den so genannten Korrekturfaktor K, der abhängig ist von der Geometrie des Probekörpers:

$$K = 1 + \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot \mu^2 \cdot I}{A \cdot l^2} \quad (3.4)$$

mit	$\mu$	Poissonzahl
	I	Flächenträgheitsmoment

Wenn die Länge des prismatischen Probekörpers mindestens dreimal größer ist als seine Querdimension, so beträgt die Korrektur weniger als 1 % und der Korrekturfaktor kann angenähert gleich 1 gesetzt werden [Poh65].

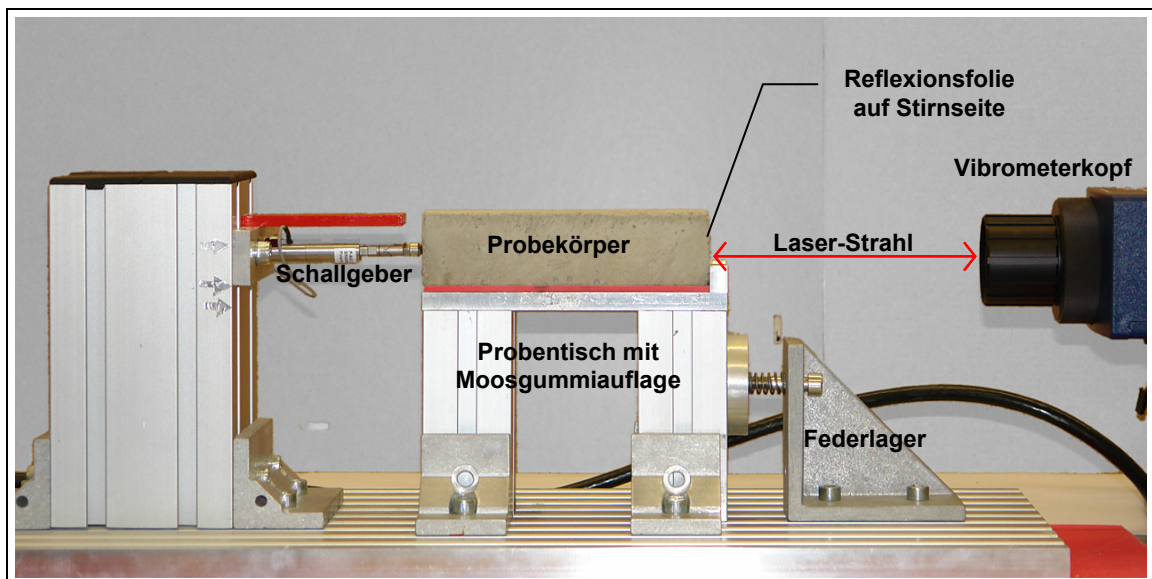
Da Normprismen diese Bedingung erfüllen, gilt für die Berechnung des dynamischen E-Moduls:

$$E_{dyn} = 4l^2 \cdot f_D^2 \cdot \rho \quad (3.5)$$

#### 3.4.3.4 EXPERIMENTELLER VERSUCHSAUFBAU LASER-VIBROMETER

Für die Bestimmung der Resonanzfrequenzen wurde ein Vibrometer der Fa. Polytec (Waldbronn) verwendet, bestehend aus einem Vibrometer-Einpunkt-Meßkopf (OFV-503) und dem Vibrometer-Controller (OFV-2500-1). Als Schallgeber diente ein Piezo-element P-842.20 mit einem PZT-Servo-Controller (E-501), beides Fa. Physik Instrumente (Karlsruhe). Die genauen technischen Spezifikationen sind den Handbüchern zu entnehmen [Poly1, Poly2, PI]. Die Messergebnisse wurden mit der Software VibSoft 4.3 der Fa. Polytec ausgewertet.

Die Lagerung der Probe erfolgte auf einem verschiebbaren Probestisch, der für eine optimale Bestimmung der Resonanzfrequenz mit einer dämpfenden Lage Moosgummi versehen war. Durch die integrierte Federung wurde die Probe bei jeder Messung mit einem konstanten Anpressdruck an den Schallgeber angekoppelt. Der genaue Versuchsaufbau ist Bild 3.17 zu entnehmen.



**Bild 3.17:** Versuchsaufbau Laser-Vibrometer (im Bild ein Probekörper ohne Messzapfen)

Für eine optimale Rückstreuung des Laserstrahles wurde die Stirnseite des Probekörpers mit einem Streifen Reflexionsfolie versehen. Als kostengünstige und gut geeignete Alternative zur Reflexionsfolie von 3M hat sich Aluminium-Klebeband der Fa. Gehring erwiesen.

#### 3.4.3.5 EINSTELLUNGEN UND DATENAUSGABE LASER-VIBROMETER

Die Anregung der Probekörper erfolgt mit einem breitbandigen Signal („Periodic Chirp“) der Frequenzen 0 bis 100 kHz. Bei den gemessenen Signalen handelt es sich um Laufzeiten des Laserstrahles, die softwareseitig in Frequenzbereiche transformiert wer-

den. Die Software VibSoft bedient sich dabei der „Fast Fourier-Transformation“ (FFT). Dieser Algorithmus wurde von [Coo65] entwickelt und wertet das Amplituden- und das Phasenspektrum der gemessenen Zeitserie aus.

Die Ausgabe der gemessenen Signale erfolgt als Frequenzen mit Angabe der dazugehörigen Amplituden. Für die Berechnung des dynamischen E-Moduls spielen die Amplituden jedoch keine Rolle, wichtig ist allein die Resonanzfrequenz. Diese liegt für die untersuchten Normprismen je nach Mischungszusammensetzung, Alter und möglichem Schädigungsgrad zwischen ca. 8 und 14 kHz und wird als höchster Peak im Diagramm deutlich sichtbar. Peaks, die zwischen 0 und ca. 5 kHz auftreten, sind vernachlässigbar, da sie Schwingungen zuzuordnen sind, die aus dem Versuchsaufbau selbst stammen. Eventuell andere auftretende (zumeist sehr kleine) Peaks sind Vielfache der jeweiligen Grundschwingung.

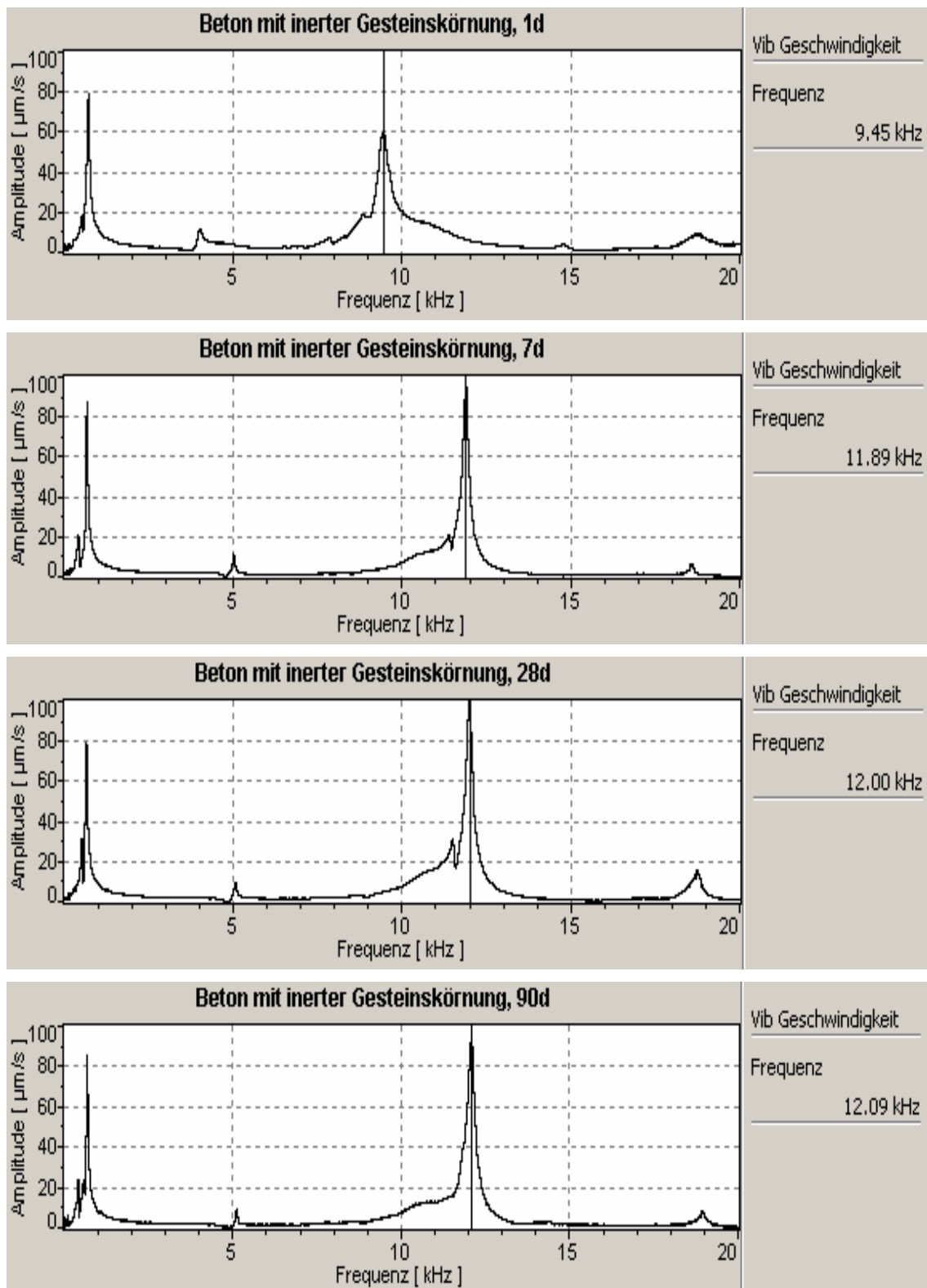
Im Bild 3.18 ist für einen Mörtel mit inerter Gesteinskörnung eine typische Resonanzfrequenzanalyse dargestellt, wie sie von der Software VibSoft ausgegeben wird. Die Resonanzfrequenz steigert sich mit zunehmendem Alter des Mörtels, wobei der größte Zuwachs innerhalb der ersten 7 Tage erfolgt, was auf die anfänglich stark fortschreitende Hydratation des Zementes zurückzuführen ist. Mit ansteigender Resonanzfrequenz ergibt sich nach Gleichung 3.5 auch ein zunehmender dynamischer E-Modul.

Für einen Mörtel mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung ist die Entwicklung der Resonanzfrequenz in Bild 3.19 aufgezeigt. Auch in diesem Beispiel nimmt die Resonanzfrequenz innerhalb der ersten 7 Tage deutlich zu, geht im Folgenden aber wieder zurück, was mit der inneren Gefügeschädigung in folge AKR zu begründen ist.

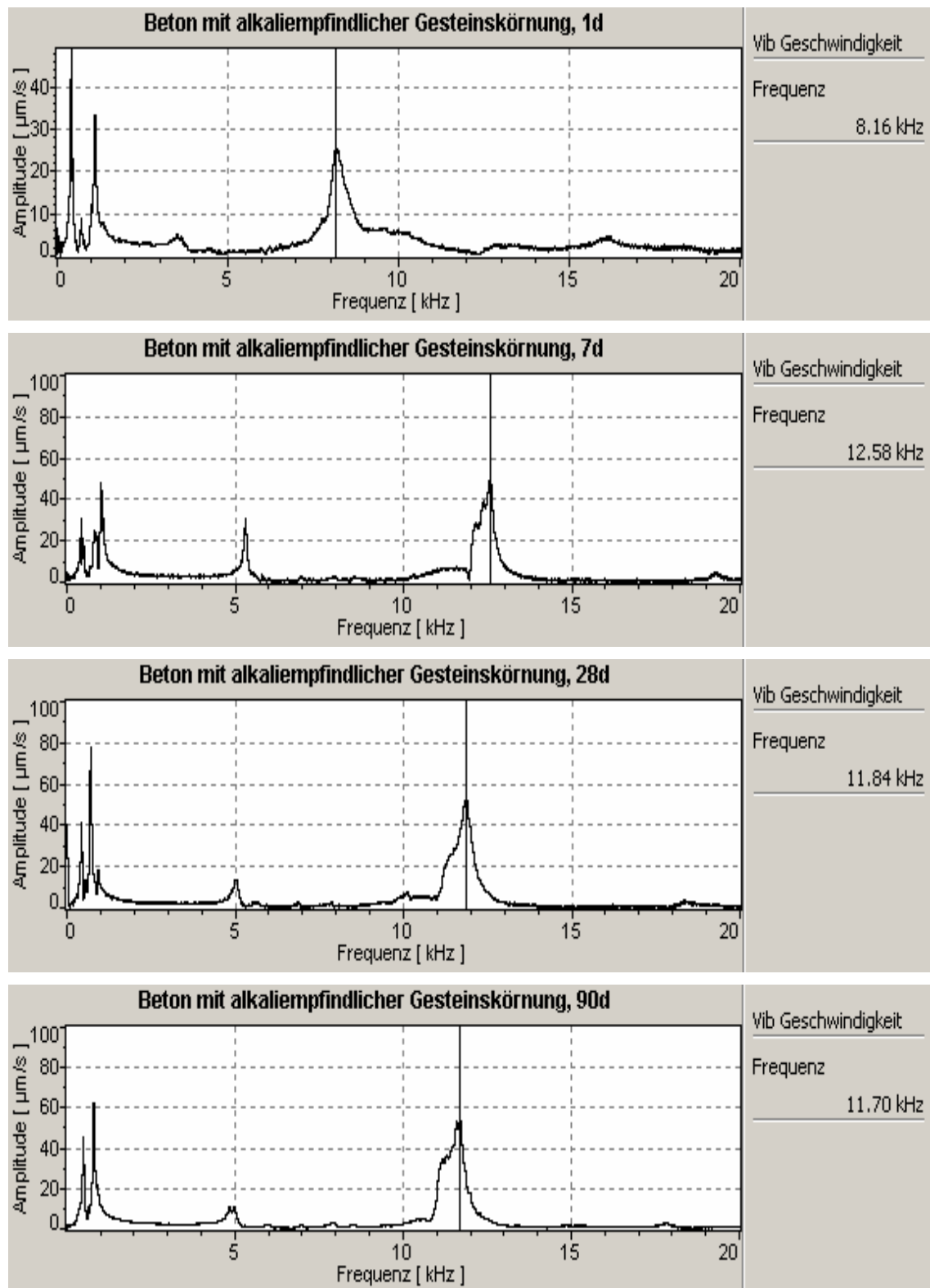
Für alle folgenden Untersuchungen wird nicht mehr explizit die Resonanzfrequenz aufgeführt, sondern der daraus errechnete dynamische E-Modul. Bei den angegebenen Messwerten handelt es sich um Mittelwerte aus 3 Einzelmessungen. Die Resonanzfrequenzen sowie das ermittelte Gewicht der Proben zur Berechnung des E-Moduls sind dem Anhang, Tabelle 7.1 bis 7.19 zu entnehmen.

#### **3.4.4 LICHT- UND RASTERELEKTRONENMIKROSKOP**

Die Gefügeänderungen (Rissbildung), die mit einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion einhergehen, können sowohl lichtmikroskopisch (LiMi) als auch rasterelektronenmikroskopisch (REM) erfasst werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden Dünnschliffe mittels LiMi und Bruchflächen bzw. Anschliffe mittels REM analysiert.



**Bild 3.18:** Resonanzfrequenzanalyse für Mörtel mit inerter Gesteinskörnung im Alter von a) 1d, b) 7d, c) 28d und d) 90d



**Bild 3.19:** Resonanzfrequenzanalyse für Mörtel mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung im Alter von a) 1d, b) 7d, c) 28d und d) 90d

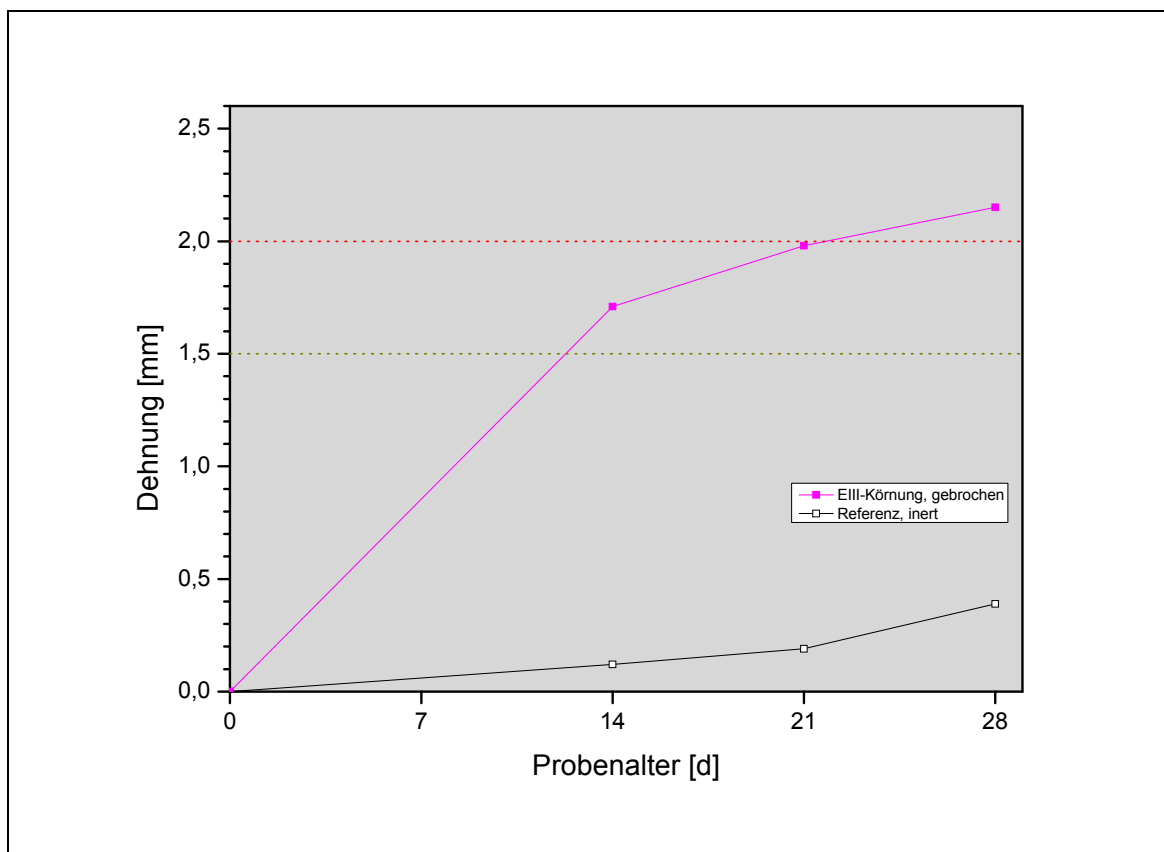


## 4 ERGEBNISDOKUMENTATION UND AUSWERTUNG

### 4.1 EIII-GESTEINSKÖRNING

#### 4.1.1 MÖRTELSCHNELLTEST

Die EIII-Gesteinskörnung und zum Vergleich inerter Normsand wurden mittels Mörtelschnelltest analysiert. Den Dehnungsverlauf zeigt Bild 4.1.



**Bild 4.1:** Mörtelschnelltest für EIII- und inerte Gesteinskörnung

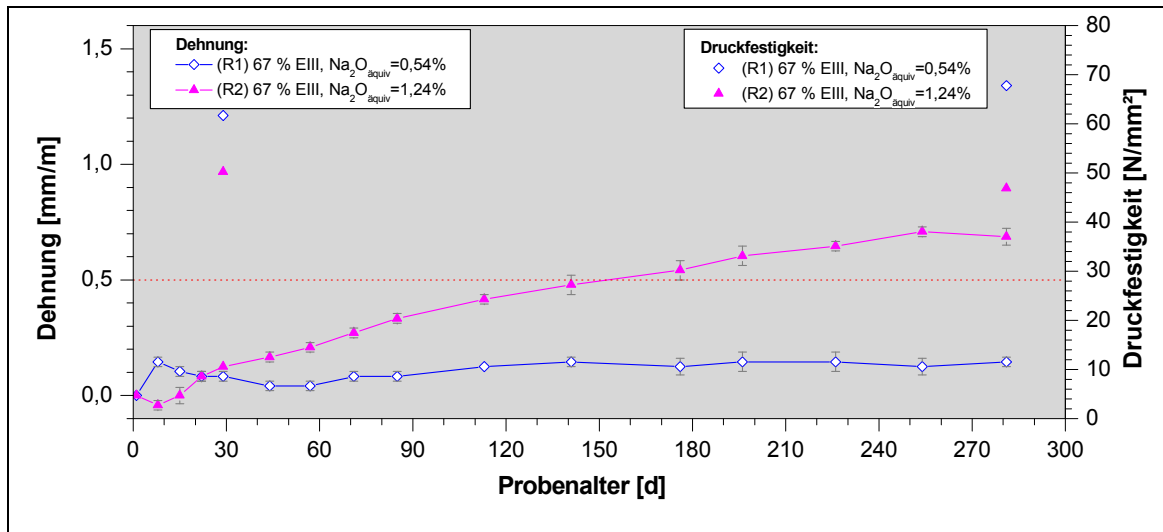
Die Probekörper mit der EIII-Gesteinskörnung erreichten nach 28 Tagen eine Dehnung von 2,15 mm/m und sind damit ihrer Einstufung entsprechend eindeutig alkalireaktiv. Die getestete inerte Gesteinskörnung bleibt mit 0,39 mm/m deutlich unter dem ersten Grenzwert von 1,5 mm/m und ist somit nicht alkalireaktiv.

#### 4.1.2 PERFORMANCEPRÜFUNG

Für die Performanceprüfung wurden Probekörper aus Mörtelmischungen mit je 500 kg Zement (Z-S und Z-H) pro m<sup>3</sup> Mörtel hergestellt. Das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis

betrug 1:3. Dabei setzte sich die zugesetzte Gesteinskörnung aus 67 % EIII-Zuschlag und 33 % Normsand zusammen. Der w/z-Wert wurde auf 0,5 eingestellt.

Die Ergebnisse für den Dehnungsverlauf sowie die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen und nach 9 Monaten sind in Bild 4.2 grafisch dargestellt. Die Entwicklung des E-Moduls kann für diese Versuchsserie nicht angegeben werden, da zu diesem Zeitpunkt das Laser-Vibrometer noch nicht verfügbar war.



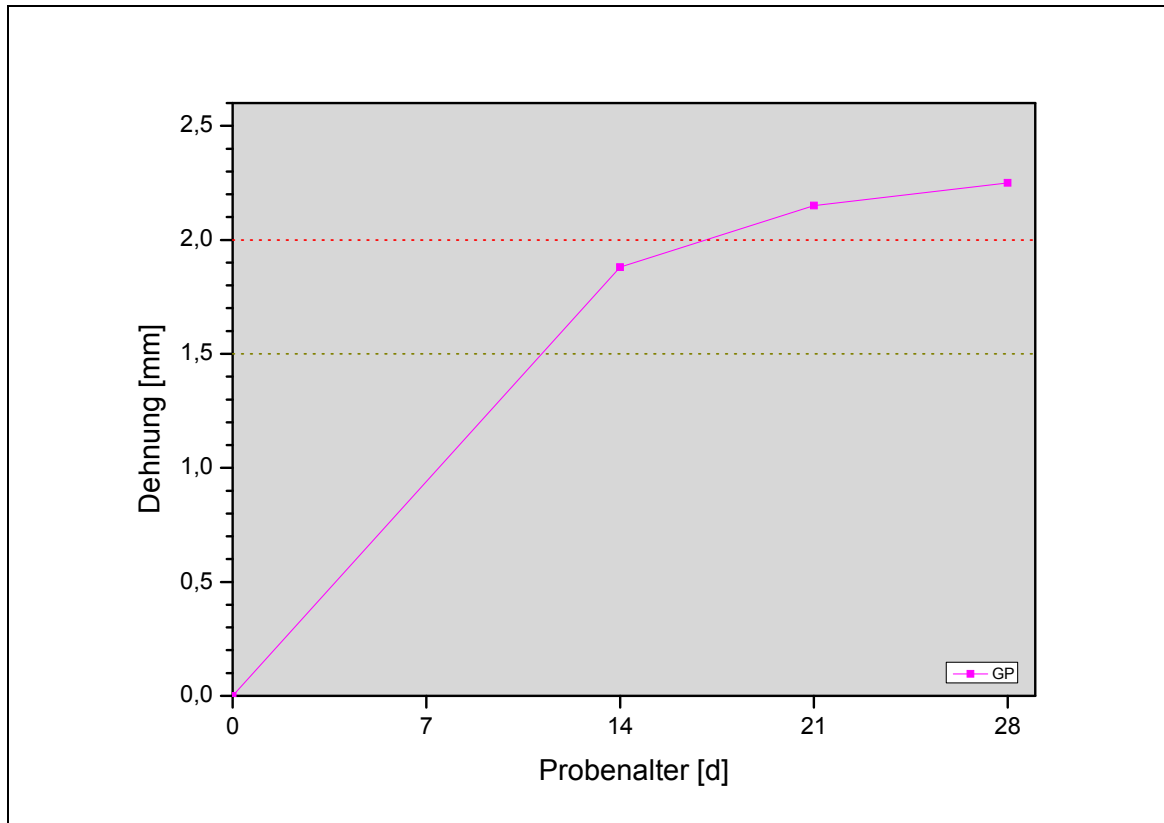
**Bild 4.2:** Dehnungsverlauf und Druckfestigkeiten von Mörtelmischungen mit 67 % EIII-Gesteinskörnung sowie alkalireichem und alkaliarmem Zement

Erwartungsgemäß zeigte die Probe R2, die mit der EIII-Gesteinskörnung und dem alkalireichen Zement hergestellt wurde, eine Dehnung im Verlauf der neunmonatigen Nebelkammerlagerung, die den kritischen Grenzwert von 0,5 mm/m überschreitet und am Ende des Untersuchungszeitraumes 0,69 mm/m erreichte. Bei Verwendung eines NA-Zementes (Mischung R1) trat dagegen keine signifikante Dehnung auf. Die 28-Tage-Druckfestigkeiten beliefen sich für R1 auf 61,7 N/mm² und für R2 auf 50,2 N/mm². Bei der ungeschädigten Probe R1 stieg die Druckfestigkeit im Verlauf der Untersuchung weiter an und erreichte nach ca. 9 Monaten einen Wert von 67,8 N/mm². Für den Mörtel R2 wurde am Ende des Untersuchungszeitraumes eine verringerte Festigkeit von 46,9 N/mm² ermittelt. Dies ist auf durch die AKR verursachte Gefügeschäden zurückzuführen, die sich festigkeitsmindernd auswirken.

## 4.2 BOROSILIKATGLASPERLEN AUS EIGENHERSTELLUNG

### 4.2.1 MÖRTELSCHNELLTEST

Die selbst hergestellten Borosilikatglasperlen (GP) wurden zunächst dem Mörtelschnelltest unterzogen, um deren grundsätzliche Eignung als alkalireaktives Material festzustellen. Der Test erfolgte an der Fraktion 1/2 mm, die ungebrochen verwendet wurde. Das Ergebnis ist in Bild 4.3 dargestellt.

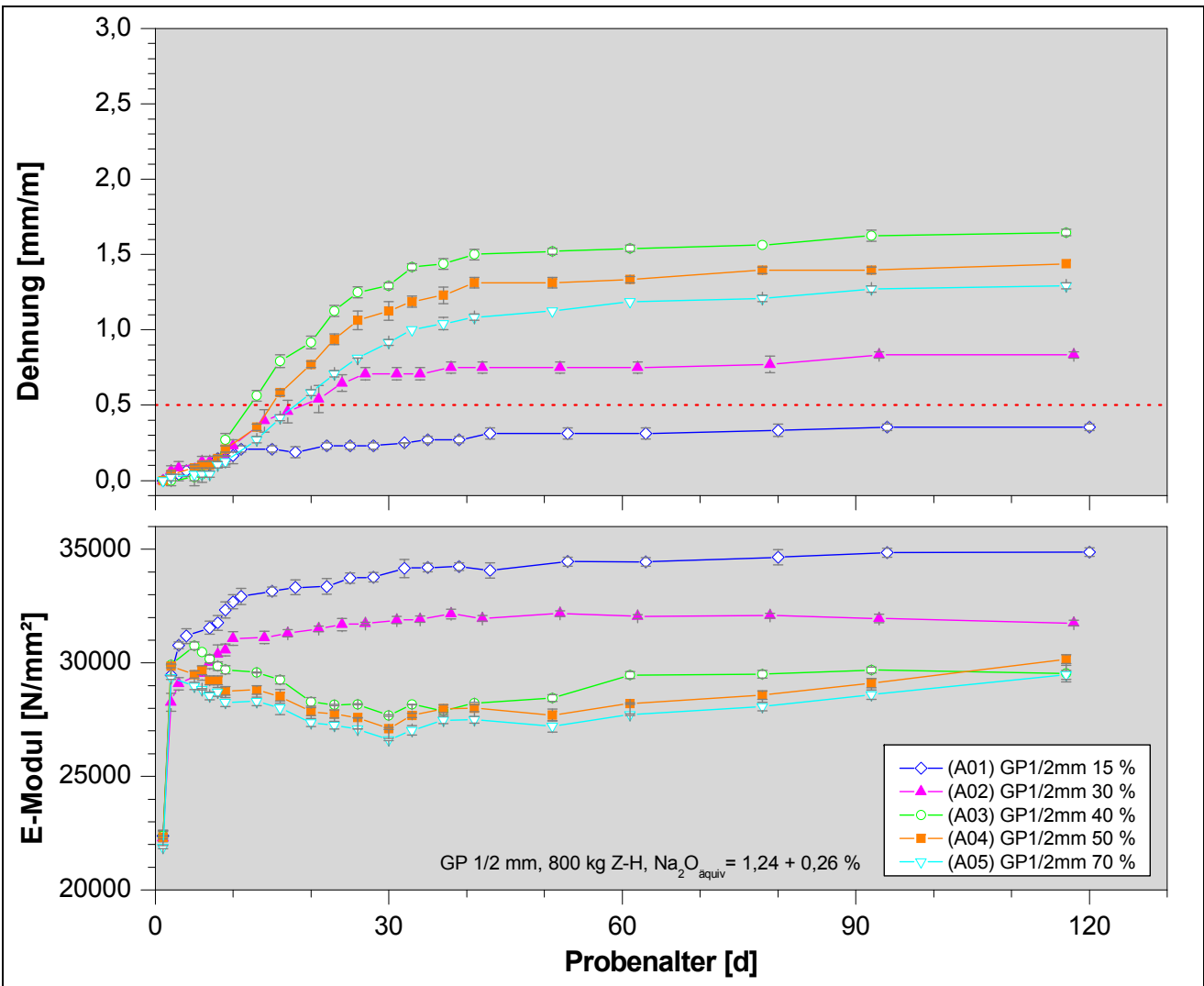


**Bild 4.3:** Mörtelschnelltest für GP der Körnung 1/2 mm

Mit 2,25 mm/m überschritten die Borosilikatglasperlen deutlich den Grenzwert von 2 mm/m und sind damit laut Definition des Mörtelschnelltests eindeutig alkalireaktiv. Qualitativ entspricht die Dehnungskurve mit ihrem steilen Anstieg in den ersten 14 Tagen und dem anschließenden flacher werdenden Verlauf der Dehnungskurve der E-III-Gesteinskörnung.

#### 4.2.2 PERFORMANCETESTS

Um eine möglichst große Expansion der Probekörper zu provozieren, wurde in einer ersten Versuchsserie mit einem hohen Alkaliangebot gearbeitet. Dies wurde durch einen sehr hohen Zementgehalt von 800 kg Zement (Z-H) pro m<sup>3</sup> Mörtel erreicht, der zudem ein Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> von 1,24 % aufwies. Außerdem wurde das Alkaliäquivalent durch Zugabe von K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> zum Anmachwasser noch zusätzlich auf insgesamt 1,5 % erhöht. Der w/z-Wert der folgenden Mischungen liegt bei 0,45 und das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis beträgt 1:2. Zwischen 15 und 70 Vol.-% der inerten Gesteinskörnung wurden gegen Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung (GP) ausgetauscht. Für die Fraktion 1/2 mm sind die Ergebnisse für die Dehnung und für den dynamischen E-Modul Bild 4.4 zu entnehmen.



**Bild 4.4:** Dehnungsverlauf und dynamischer E-Modul von Mörtelmischungen mit GP der Körnung 1/2 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalireichen Zementes und zusätzlicher  $\text{K}_2\text{SO}_4$ -Gabe mit einem resultierenden Gesamt- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 1,5 \%$

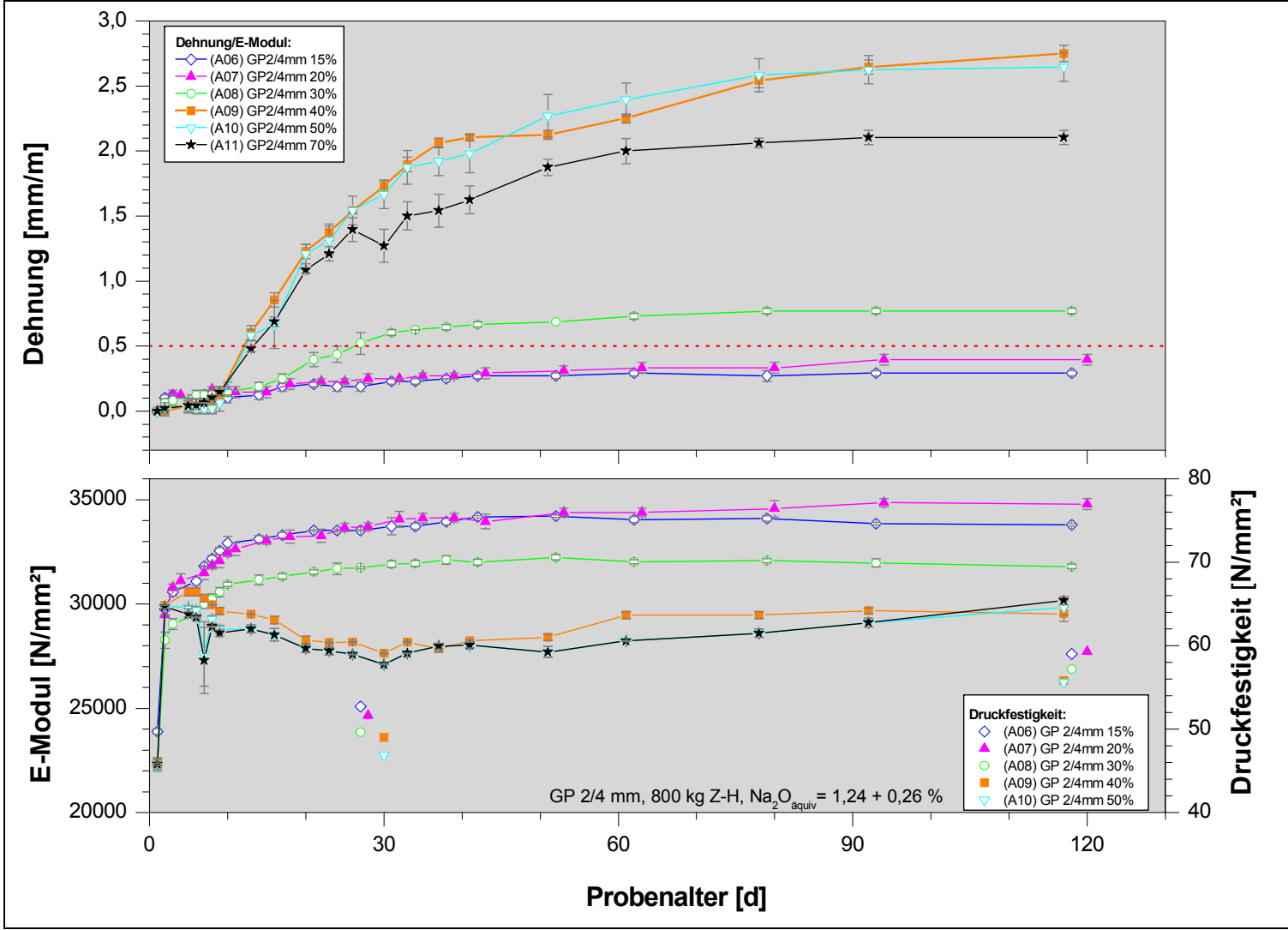
Bis auf Mischung A01, die mit 15 % den geringsten Anteil an GP aufwies, überschritten alle anderen hergestellten Mörtelmischungen den kritischen Dehnungsgrenzwert innerhalb der ersten 4 Wochen nach Herstellung. Der Kurvenanstieg ist während der ersten 4 bis 6 Wochen jeweils am steilsten, innerhalb dieses Zeitraumes fand also der größte Teil der Dehnung statt, während danach die Dehnungskurve kaum noch anstieg.

Mischung A03 (40 % GP) erreichte nach 4 Monaten mit 1,65 mm/m die größte Dehnung, während A04 (50 % GP) mit 1,44 mm/m und A05 (70 % GP) mit 1,29 mm/m maximaler Dehnung zurück blieben. Der Mörtel mit 30 % GP (A02) erreichte nur eine Dehnung von 0,83 mm/m am Ende des Untersuchungszeitraumes. Eine oberflächlich sichtbare Rissbildung konnte bei keinem der Probekörper festgestellt werden.

Die ungeschädigte Mörtelprobe A01 entwickelte mit 34870 N/mm<sup>2</sup> den höchsten dynamischen E-Modul. Infolge Zementhydratation fand der größte Zuwachs von 22390 auf 32035 N/mm<sup>2</sup> innerhalb der ersten 7 Tage statt. Für die Mörtel A03, A04 und A05 gilt eine qualitativ ähnliche E-Modulentwicklung. Dabei lagen die 7-Tage-Werte bei 30180 N/mm<sup>2</sup>, 29390 N/mm<sup>2</sup> bzw. 28550 N/mm<sup>2</sup>. In den folgenden 3 Wochen war für diese 3 Mischungen ein Abfall des E-Moduls auf 27700 N/mm<sup>2</sup> (A03), 27110 N/mm<sup>2</sup> (A04) bzw. 26620 N/mm<sup>2</sup> (A05) zu verzeichnen, dessen Ursache in der Schädigung des Gefüges infolge AKR zu sehen ist. Dabei fielen der Hauptdehungsanteil und das Erreichen des minimalsten E-Moduls zusammen. Danach stiegen die E-Moduln innerhalb der folgenden Monate wieder an und erreichten Werte von 29530 N/mm<sup>2</sup> (A03), 30160 N/mm<sup>2</sup> (A04) und 29480 N/mm<sup>2</sup> (A05). Da der größte Teil der Alkalien, die für eine AKR zur Verfügung standen, offenbar verbraucht war, führten die Zementhydratation und das Ausheilen der Risse zu einer Erholung des E-Moduls. Bei Mörtel A02, der sich zwar über den kritischen Grenzwert hinaus dehnte, konnte keine E-Modul-Minderung nach 7 Tagen festgestellt werden, allerdings war hier der Zuwachs mit 31750 N/mm<sup>2</sup> am Ende des Untersuchungszeitraumes deutlich geringer als bei der ungeschädigten Probe A01. Offenbar überlagerte die fortschreitende Zementhydratation die Schädigung infolge AKR so, dass keine Einbußen beim E-Modul wirksam wurden.

Zusammenfassend lässt sich für GP der Körnung 1/2 mm feststellen, dass sich bei Mörtelmischungen mit einem Anteil von mind. 30 % GP und einem hohem Zement- und Alkaligehalt innerhalb von ca. 4 bis 6 Wochen eine Dehnung über den kritischen Grenzwert hinaus einstellte, die mit einer Minderung des E-Moduls einherging. Der pessimale Gehalt an GP 1/2 mm lag bei 40 % (siehe auch Bild 4.8).

Für GP der Fraktion 2/4 mm galten die gleichen Versuchsbedingungen wie bei GP der Körnung 1/2 mm. Die Ergebnisse für Dehnungen und dynamischen E-Modul sind in Bild 4.5 grafisch dargestellt.



**Bild 4.5:** Dehnungsverlauf, dynamischer E-Modul und Druckfestigkeiten von Mörtelmischungen mit GP der Körnung 2/4 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalireichen Zeementes und zusätzlicher  $\text{K}_2\text{SO}_4$ -Gabe mit einem resultierenden Gesamt- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 1,5 \%$

Ähnlich wie bei Fraktion 1/2 mm zeichnete sich auch für Korngröße 2/4 mm ein pessimaler Gehalt an GP ab (siehe auch Bild 4.8). Die Dehnungskurven für Mörtel A09 (40 % GP) und A10 (50 % GP) überlagerten sich teilweise und wiesen mit 2,75 mm/m (A09) und 2,65 mm/m (A10) die größten Dehnungen am Ende des Untersuchungszeitraumes auf. Auch Mischung A11 (70 % GP) hatte innerhalb der ersten 4 Wochen einen ähnlichen Dehnungskurvenverlauf wie A09 und A10, blieb dann aber hinter diesen zurück und erreichte eine maximale Dehnung von 2,10 mm/m. Die kritische Dehnung wurde von allen 3 Mischungen innerhalb der ersten 4 Wochen nach Herstellung erreicht. Dies galt auch für die Probekörper der Rezeptur A08 (30 % GP), allerdings dehnten sich diese nur maximal 0,77 mm/m. Die Mörtel A06 (15 % GP) und A07 (20 % GP) überschritten den kritischen Dehnungswert innerhalb des Untersuchungszeitraumes nicht.

Ergänzend zu den Werten für den dynamischen E-Modul wurden in dieser Serie auch Druckfestigkeitsmessungen (ausgenommen A11) durchgeführt, die nach 28 Tagen und am Ende des Untersuchungszeitraumes erfolgten. Die ungeschädigten Proben A06 und A07 zeigten eine annähernd gleiche, über die Zeit zunehmende E-Modul-Entwicklung und erreichten nach ca. 4 Monaten die höchsten E-Moduln dieser Serie. Die erzielten Maximalwerte unterschieden sich nur geringfügig und lagen bei 33790 N/mm<sup>2</sup> (A06) bzw. 34790 N/mm<sup>2</sup> (A07). Dazu korrespondierten die Druckfestigkeiten, die nach 28 Tagen / 4 Monaten bei 52,7 / 59,0 N/mm<sup>2</sup> (A06) bzw. bei 51,6 / 59,3 N/mm<sup>2</sup> (A07) lagen.

Mörtel A08, der den kritischen Grenzwert nur geringfügig überschritt, verzeichnete ebenfalls einen stetig zunehmenden E-Modul, jedoch fiel der Zuwachs gegenüber A06 und A07 deutlich geringer aus. Es wurde ein maximaler  $E_{dyn}$  von 31790 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Für die Druckfestigkeit galt dieser Zusammenhang ebenfalls, sie erreichte nach 28 Tagen 49,6 N/mm<sup>2</sup> und nach ca. 4 Monaten 57,2 N/mm<sup>2</sup> und fiel damit geringer aus als bei A06 und A07.

Bei den Proben A09 bis A11 machte sich die schädigende AKR durch einen E-Modul-Abfall nach ca. 7 bis 10 Tagen nach Herstellung bemerkbar, allerdings stieg dieser nach ca. 4 Wochen wieder an. Teils überlagerten sich die Kurvenverläufe und die gemessenen Endwerte der drei Proben lagen mit 29500 N/mm<sup>2</sup> (A09), 29820 N/mm<sup>2</sup> (A10) und 30160 N/mm<sup>2</sup> eng beieinander. Die 28d / 4Monate-Druckfestigkeiten für A09 und A10 wurden mit 46,9 / 55,6 N/mm<sup>2</sup> bzw. 49,0 / 55,8 N/mm<sup>2</sup> ermittelt und fielen damit geringer aus als bei allen anderen Proben. Hier wurden jedoch nicht nur die Einflüsse der AKR deutlich, sondern auch der teils sehr hohe Gehalt an GP. Die GP mit ihrer geringeren Dichte als der inerte Zuschlag minderten die Festigkeits- und damit auch die E-Modulentwicklung.

Auch in dieser Versuchsreihe wurde der Zusammenhang zwischen Dehnung und E-Modul-Entwicklung der Probekörper deutlich. Dehnungen unterhalb des kritischen Grenzwertes minderten den E-Modul nicht. Offenbar ging diese geringfügige Dehnung nicht oder nur mit einer unerheblichen Anzahl an Mikrorissen einher, die sich auf den E-Modul mindernd auswirken könnten. Anders verhält sich die E-Modulentwicklung

bei größeren Dehnungen über den kritischen Grenzwert hinaus, in diesem Fall kam es zu einem Abfall des E-Moduls. Mit fortschreitendem Alter des Mörtels stieg der E-Modul jedoch wieder an, was durch die fortschreitende Hydratation des Zementes zu erklären ist, die durch Ausheilungsprozesse im Gefüge der festigkeitsmindernden Wirkung von Mikrorissen entgegen wirkt.

War die Dehnung infolge AKR eher gering, so fiel die Zunahme des E-Moduls gegenüber ungeschädigten Proben insgesamt geringer aus, ein E-Modul-Abfall trat jedoch nicht ein. Die ermittelten Druckfestigkeiten korrelierten dabei mit  $E_{\text{dyn}}$  zum jeweiligen Zeitpunkt.

Im Vergleich zu GP der Körnung 1/2 mm erzielten Mörtel mit GP der Fraktion 2/4 mm die größeren maximalen Dehnungen. Der pessimale Gehalt an GP konnte aufgrund des ähnlichen Dehnungsverlaufes von A09 und A10 nicht exakt angegeben werden und lag zwischen 40 und 50 %.

Die Fraktion 4/8 mm wurde unter analogen Versuchsbedingungen wie 1/2 und 2/4 mm untersucht, die Ergebnisse für Dehnung, E-Modul und Druckfestigkeit sind in Bild 4.6 im Diagramm dargestellt.

Für keinen der untersuchten Mörtel A12 bis A16 mit 20 bis 70 % GP 4/8 mm konnte innerhalb von 4 Monaten eine Dehnung über den kritischen Grenzwert hinaus festgestellt werden. Die größte Dehnung erreichte A14 mit 0,44 mm/m, womit auch bei dieser Körnung das Pessimum bei einem GP-Gehalt von 40 % GP lag (siehe auch Bild 4.8).

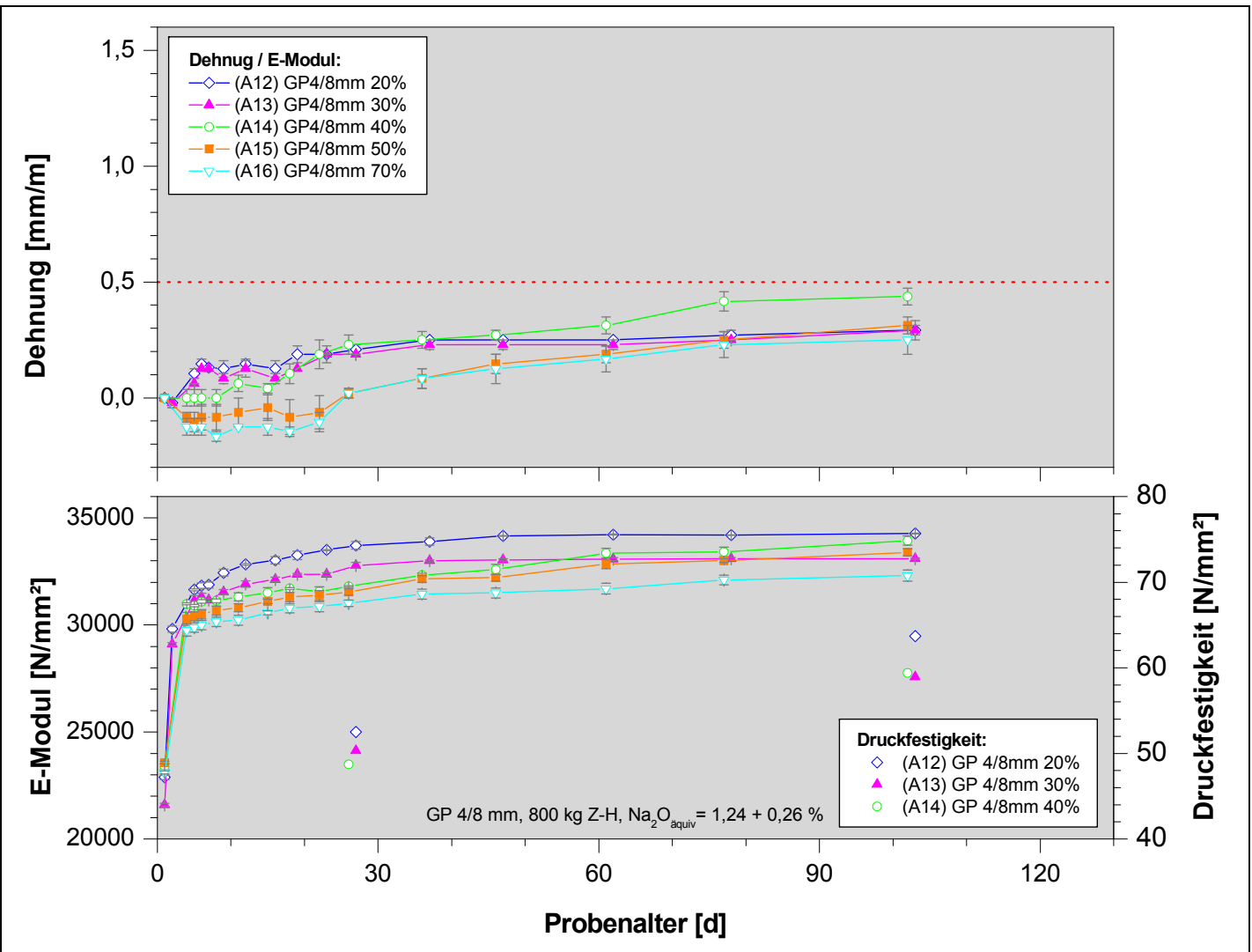
Der Verlauf der E-Modul-Entwicklung aller Mörtel entsprach der ungeschädigter Proben (also keine E-Modul-Abnahme), die Maximalwerte nach ca. 115 Tagen lagen zwischen 34270 N/mm<sup>2</sup> (A12) und 32310 N/mm<sup>2</sup> (A16).

Anhand der Ergebnisse für Dehnung und E-Modul ist die GP-Körnung 4/8 mm als nicht geeignet für den Nachweis einer AKR einzustufen.

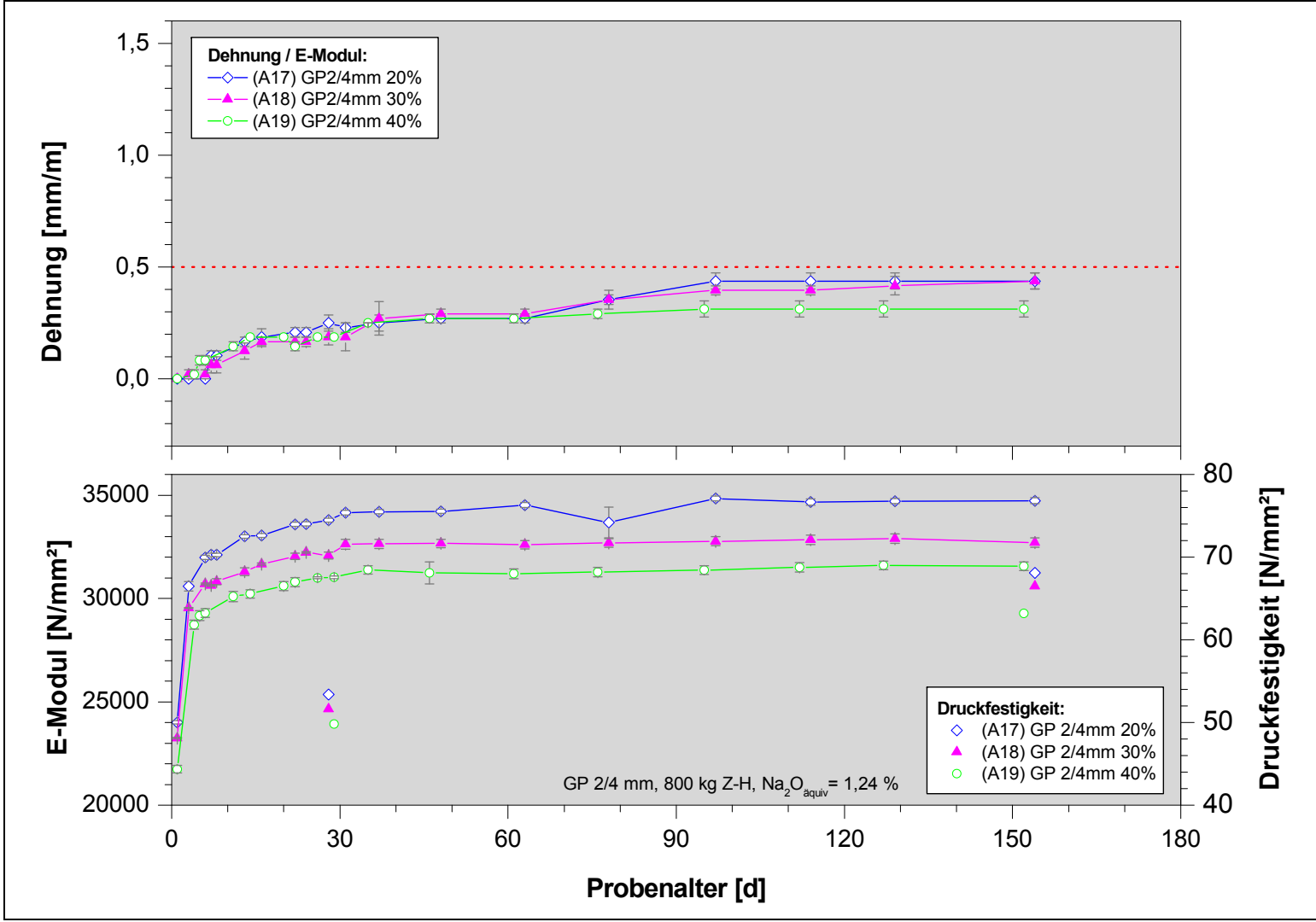
Da sich GP der Fraktion 2/4 mm nach den vorangegangenen Untersuchungen als reaktivste der drei Körnungen herausgestellt hatte, wurde diese im Folgenden in Anteilen von 20, 30 und 40 % in Mörtelproben verarbeitet, die keine zusätzlichen Alkalien enthielten. Auch in dieser Versuchsreihe wurde mit einem verhältnismäßig hohen Anteil von 800 kg Zement (Z-H,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 1,24 \%$ ) pro m<sup>3</sup> Mörtel gearbeitet. Der w/z-Wert betrug 0,45, das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis wurde mit 1:2 festgelegt. Die Grafische Darstellung der Messwerte für Dehnung, E-Modul und Druckfestigkeit ist Bild 4.7 zu entnehmen.

Für keine der drei Mörtelmischungen A17 bis A19 konnte eine kritische Dehnung innerhalb von 5 Untersuchungsmonaten festgestellt werden. Die maximalen Dehnungen beliefen sich auf 0,44 mm/m (A17 und A19) und auf 0,31 mm/m (siehe auch Bild 4.8).





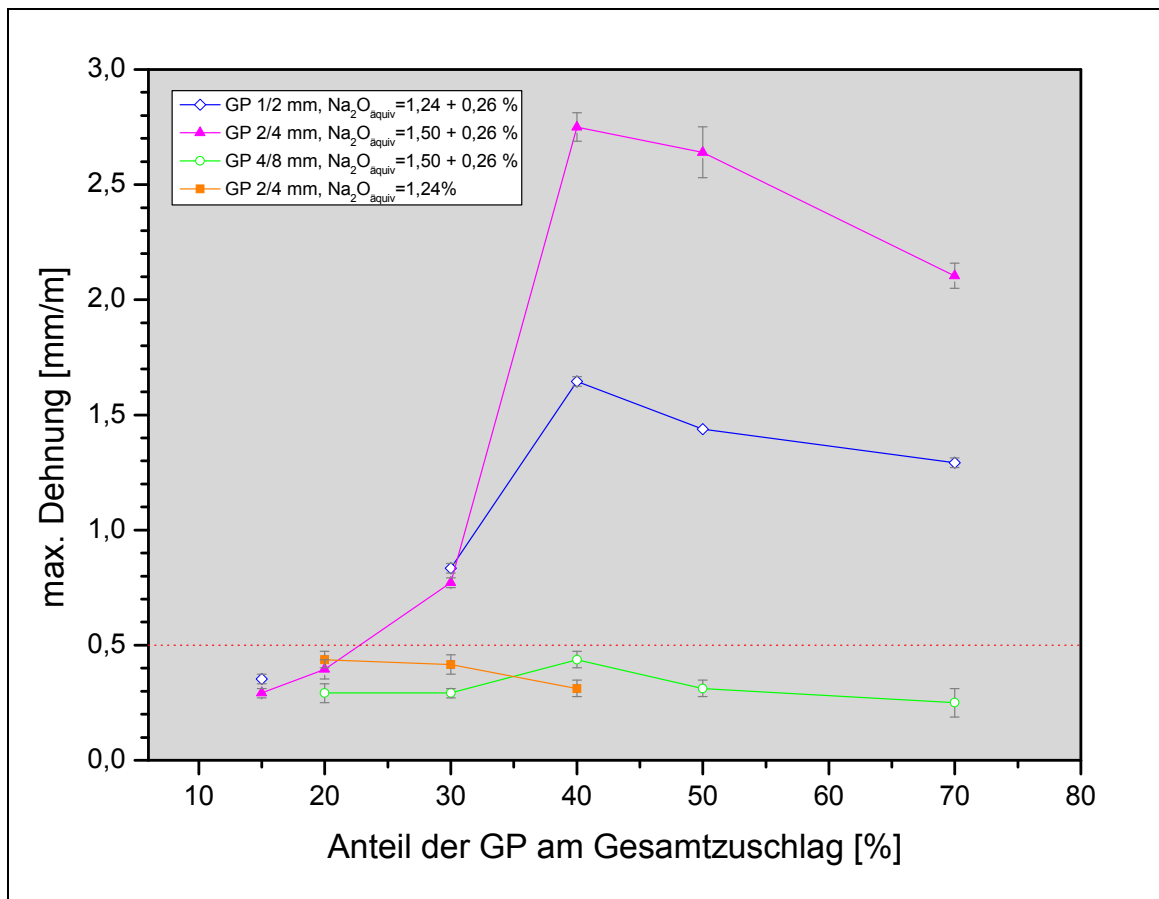
**Bild 4.6:** Dehnungsverlauf und dynamischer E-Modul von Mörtelmischungen mit GP der Körnung 4/8 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalireichen Zementes und zusätzlicher  $\text{K}_2\text{SO}_4$ -Gabe mit einem resultierenden Gesamt- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 1,5 \%$



**Bild 4.7:** Dehnungsverlauf, dynamischer E-Modul und Druckfestigkeiten von Mörtelmischungen mit GP der Körnung 2/4 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalireichen Zeementes mit einem natürlichen Na<sub>2</sub>O<sub>equiv</sub> = 1,24 %

Bei den E-Modul-Verläufen der Mischungen A17 bis A19 war keine Minderung feststellbar, jedoch fielen die 1d-/ 7d- und 5Monate-Werte mit 24000 / 32100 / 34730 N/mm<sup>2</sup> (A17), 23250 / 30700 / 33160 N/mm<sup>2</sup> (A18) und 21730 / 29300 / 31560 N/mm<sup>2</sup> (A19) umso kleiner aus, je höher der Anteil an GP war. Auch hier wurde der festigkeitsmindernde Einfluss der GP deutlich, die mit ihrer im Vergleich zur inerten Gesteinskörnung niedrigeren Rohdichte eine geringere E-Modul-Entwicklung bedingten. Dieser Aspekt galt ebenso für die gemessenen Druckfestigkeiten nach 28 Tagen und am Ende des Untersuchungszeitraumes. Die Werte beliefen sich auf 53,4 / 68,1 N/mm<sup>2</sup> (A17), 51,6 / 66,5 N/mm<sup>2</sup> (A18) und 49,8 / 63,2 N/mm<sup>2</sup>.

Zusammenfassend sind die maximalen Dehnungen der Mörtel mit GP in Abhängigkeit von deren Anteil am Gesamtzuschlag, der Korngröße und vom Alkaliäquivalent in Bild 4.8 dargestellt:

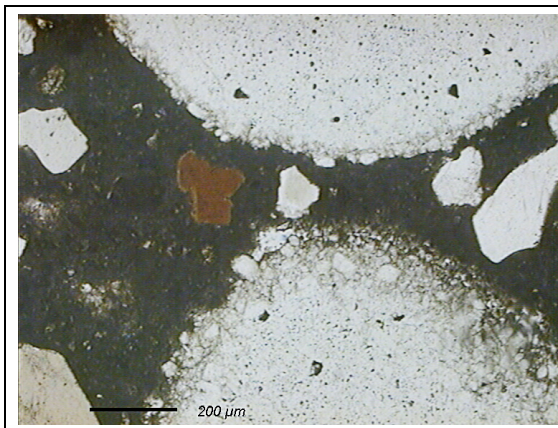


**Bild 4.8:** Einfluss des GP-Anteiles am Gesamtzuschlag auf die maximale Dehnung von Mörtelprismen in Abhängigkeit von der Korngröße und vom Alkaligehalt

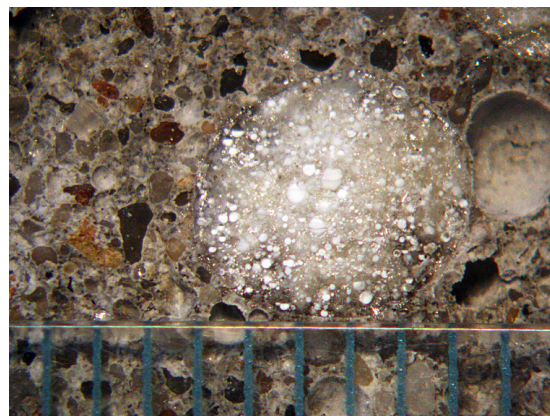
Da der Schädigungsgrad durch den Abfall des E-Moduls bei Proben mit einer kritischen Dehnung infolge AKR gut wieder gegeben wird, wird im Folgenden auf die Druckfestigkeitsprüfung verzichtet. Dies ist außerdem nötig, um Probenmaterial zu sparen. Weiterhin lässt sich die durch AKR bedingte Gefügeschädigung durch die fortlaufende Messung der Resonanzfrequenz an ein und derselben Probe und deren Umrechnung in

$E_{\text{dyn}}$  genauer verfolgen. Auf die Korrelation des dynamischen E-Moduls mit der Druckfestigkeit wird in Abschnitt 4.2.3, S.70, näher eingegangen.

Zusammenfassend betrachtet ergab sich anhand der erfolgten Untersuchungen für die Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung durchaus eine Alkaliempfindlichkeit. Dies wird auch in Bild 4.9 deutlich, welches eine Borosilikatglasperle aus der Fraktion 2/4 mm (Mörtel A09) zeigt, deren scharfe Abgrenzung zur Zementsteinmatrix nicht mehr vorhanden ist und eine sich durch den Angriff der Alkalien auflösende Randzone zeigt. Risse konnten jedoch nicht nachgewiesen werden. Eine mögliche Ursache dafür könnte die zu hohe Porosität der GP sein. Das sich bildende Alkali-Silikat-Gel sammelte sich in den Poren der einzelnen Körner (Bild 4.10) und konnte so offenbar keinen ausreichenden Quelldruck aufbauen, um insbesondere bei geringerem Alkaliangebot zu Dehnungen im Korn selbst und damit auch in der Zementsteinmatrix zu führen.



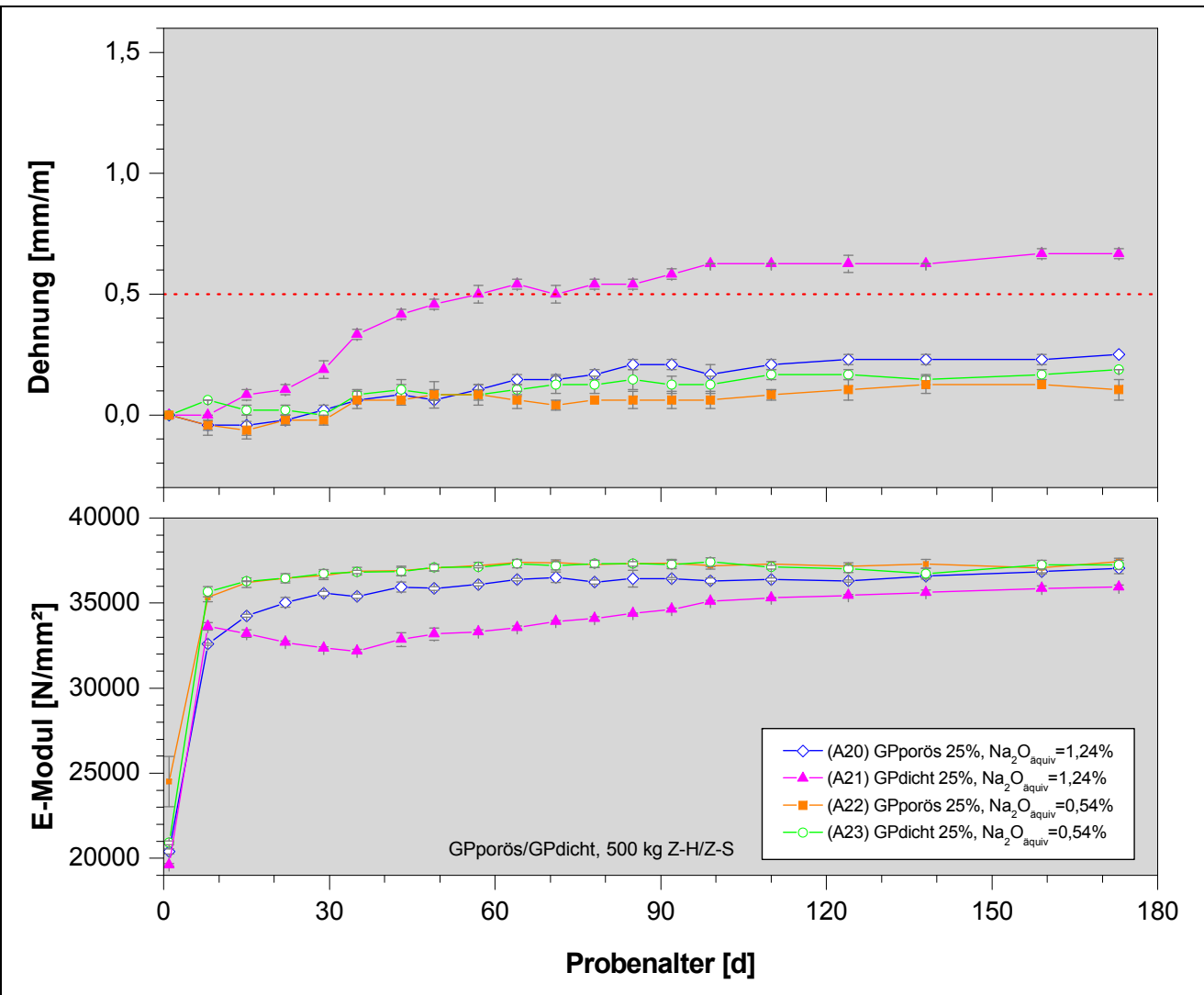
**Bild 4.9:** Dünnschliff, 5fache Vergrößerung: Glasperle der Fraktion 2/4 mm (Mörtel A09) mit sich auflösender Randzone infolge Angriff durch Alkalien



**Bild 4.10:** Aufnahme Stereolupe: Glasperle der Fraktion 2/4 mm (Mörtel A09), deren Poren mit Alkali-Kieselsäure-Gel gefüllt sind (Abstand der Messmarken 1mm)

Die Porosität betraf nicht alle Körner einer Fraktion gleichermaßen, insbesondere bei Fraktion 4/8 mm waren schon augenscheinlich Inhomogenitäten erkennbar. Aus diesem Grunde wurden einzelne Körner nach ihrer Dichte separiert (vergleiche auch Abschnitt 3.2.4.3, S. 38 ff.).

Die GP-Körnung 4/8 mm wurde nach porösen (GPporös) und dichten (GPdicht) Körnern sortiert, anschließend gebrochen und die Fraktion 2/4 mm ausgesiebt. Dieses Material wurde in Mörtelrezepturen gegen 25 % der inerten Gesteinskörnung ausgetauscht. Verwendet wurden 500 kg alkalireicher (Z-H) bzw. NA-Zement (Z-S) / m<sup>3</sup> Mörtel. Der w/z-Wert wurde auf 0,5 eingestellt und das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis entsprach 1:3. Zusätzliche Alkalien kamen nicht zum Einsatz. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Bild 4.11 grafisch dargestellt.



**Bild 4.11:** Dehnungsverlauf und dynamischer E-Modul von Mörtelmischungen mit 25 % GPporös und GPdicht unter Verwendung eines alkalireichen und eines alkalarmen Zementes

Zu allererst kann festgestellt werden, dass die Mörtelmischungen mit alkaliarmem Zement und 25 % GPporös bzw. GPdicht (A22 und A23) weder im Dehnungs- noch im E-Modul-Verlauf Anzeichen einer schädigenden AKR zeigten. Bei Verwendung von alkalireichem Zement und 25 % GPporös bzw. GPdicht (A20 und A21) reagierte der Mörtel mit Zusatz von GPdicht jedoch mit einer Überschreitung des kritischen Grenzwertes nach 2 Monaten und erreichte nach ca. 6 Monaten eine maximale Dehnung von 0,67 mm/m. Auch in der Entwicklung des E-Modul war analog zur Dehnung zunächst eine Minderung feststellbar, die mit fortschreitendem Alter des Betons wieder aufgehoben wurde

Anhand dieser Versuchsserie wird der Einfluss der Porosität deutlich, die die Alkaliempfindlichkeit der Körnung wesentlich mitbestimmt. Da es sich um eine offene Porosität handelte (vgl. Kap. 3.2.4.2, S. 36 ff.), konnten die Alkalien zwar ins Korn eindringen und Alkali-Silikat-Gel bilden (Bild 4.10), dieses baute aber nicht den Quelldruck auf, um eine Expansion der Probekörper zu bedingen. Die an sich vorhandene Reaktivität der Borosilikatglasperlen gegenüber Alkalien fällt also nicht empfindlich genug aus, um auch bei Rezepturen ohne zusätzliche Alkalien (Mörtel A17 bis A19) eine AKR zuverlässig anzuzeigen. Während die zusätzlichen Alkalien, die bereits im Anmachwasser vorhanden waren (Mörtel A01 bis A018), für eine Reaktion sofort zur Verfügung stehen, müssen die im Zement enthaltenen Alkalien zunächst in die Porenflüssigkeit übergehen. Dies dauert je nach Bindung (sulfatisch oder oxydisch) unterschiedlich lang, so dass nicht alle im Alkaliäquivalent ausgedrückten Alkalien sofort oder überhaupt für eine AKR verfügbar sind. Abschließend betrachtet sind die Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung als Referenzkörnung aufgrund mangelnder Sensitivität nicht geeignet.

#### **4.2.3 KORRELATION DES E-MODULS MIT DER DRUCKFESTIGKEIT**

Eine Korrelation der gemessenen Druckfestigkeiten  $f_{cm}$  und der errechneten Werte des dynamischen E-Moduls  $E_{dyn}$  kann im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der geringen Datendichte nur qualitativer und nicht quantitativer Natur sein. Als Modell wurde die folgende Gleichung gewählt:

$$E_{dyn} = F(f_{cm}) = A \cdot f_{cm}^{1/x} \cdot m \quad (4.1)$$

mit

A: Faktor für den Einfluss der Betonzusammensetzung

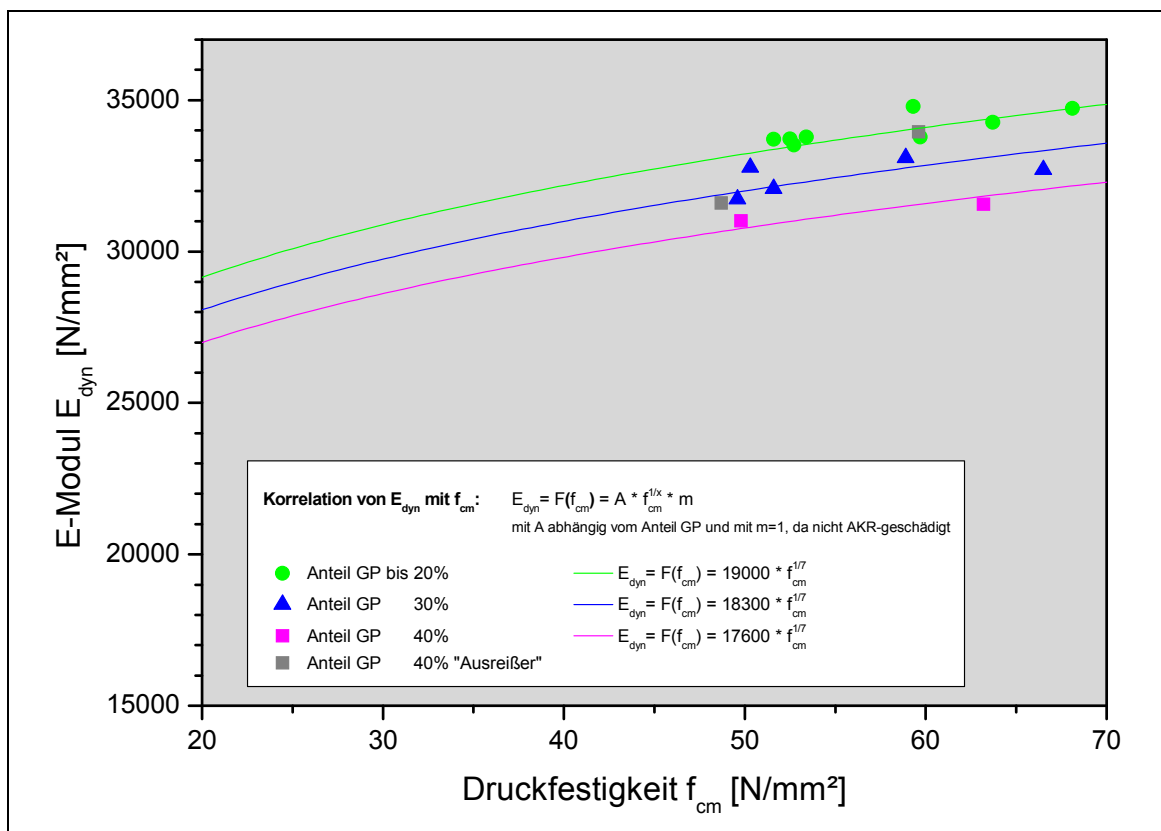
x: Faktor f. den Einfluss der Dauer des Untersuchungszeitraumes

m: Minderungsfaktor im Falle einer AKR-Schädigung

Der Faktor A steht dabei stellvertretend für einen Term, der die Betonzusammensetzung mit Art und Menge des verwendeten Zementes sowie der Gesteinskörnung, w/z-Wert, evt. enthaltene Porosität etc. in entsprechender Gewichtung wiedergibt. Die hier zu korrelierenden Werte stammen alle von Mörtelprismen mit im Wesentlichen gleicher Zusammensetzung, die sich nur durch die Menge der zugesetzten GP unterscheiden. Da sich die porösen Glasperlen mindernd auf Festigkeit und E-Modul auswirken, muss sich der Wert des Faktors A mit zunehmender Menge an GP verringern.

Der Faktor  $x$  ist abhängig von der Dauer des Untersuchungszeitraumes. Da Druckfestigkeit und E-Modul (ungeschädigter) Mörtel- und Betonproben mit zunehmendem Alter zwar steigen, sich aber asymptotisch einem Wert annähern, muss eine Korrelationskurve diese Bedingung ebenfalls erfüllen. Je größer der Faktor  $x$  gewählt wird, desto flacher verläuft die Kurve. In der vorliegenden Arbeit wurde die Druckfestigkeit bis zu 150 Tage nach Herstellung ermittelt, so dass der Faktor  $x$  gleich bleibend für alle Korrelationskurven mit dem Wert 7 gewählt wurde.

Der Minderungsfaktor  $m$  ist 1, wenn eine AKR-Schädigung, also eine Dehnung der Proben über den kritischen Grenzwert hinaus, nicht gegeben ist. Anderenfalls ist in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad  $m$  kleiner 1 zu wählen, so dass die Korrelationskurve abgesenkt wird.



**Bild 4.12:** Korrelation des dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit für ungeschädigte Proben in Abhängigkeit von deren Anteil an GP

In Bild 4.12 ist der E-Modul gegen die Druckfestigkeit für ungeschädigte Mörtelprismen aufgetragen. In Abhängigkeit von deren GP-Gehalt lassen sich diese einer entsprechenden Korrelationskurve zuordnen. Während die Faktoren  $x = 7$  und  $m = 1$  konstant blieben, beläuft sich Faktor  $A$  für Mörtel mit einem GP-Anteil von maximal 20 % auf 19000 und sinkt mit steigendem GP-Gehalt auf 18300 bei 30 % GP bzw. auf 17600 bei 40 % GP.

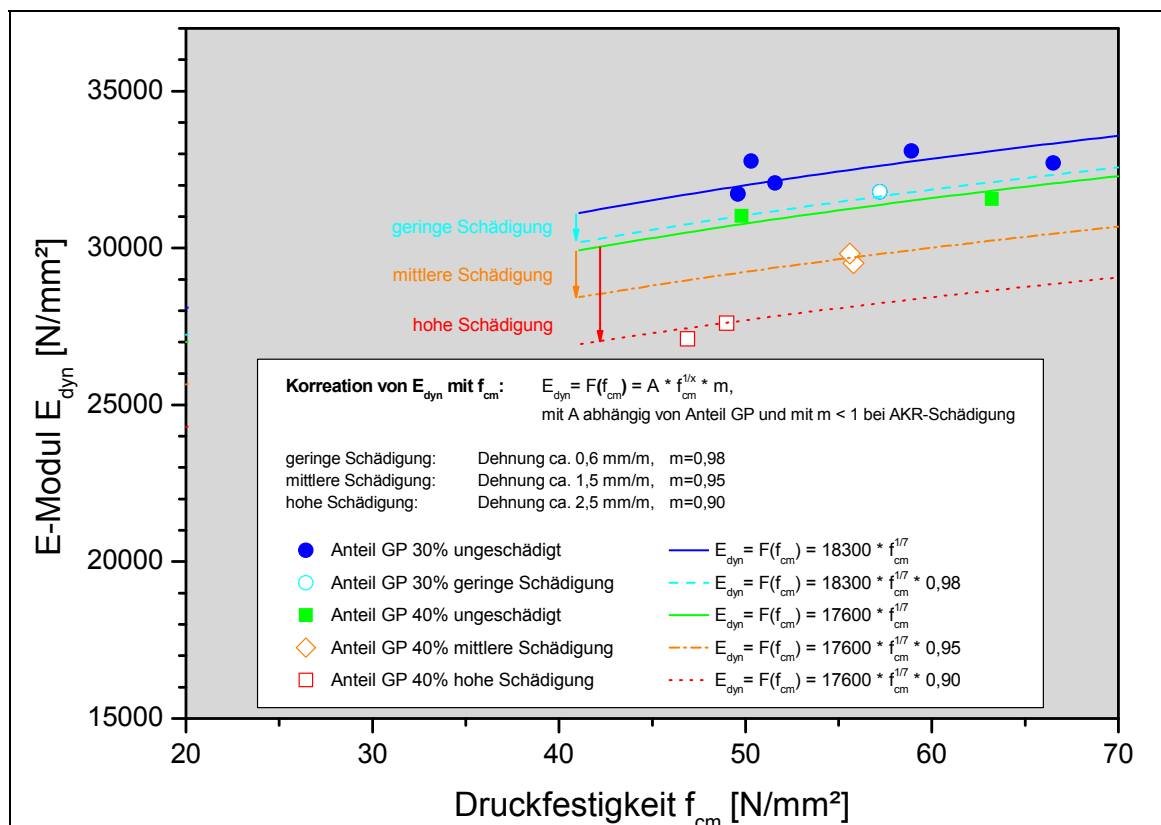
Während sich die Punkte für bis zu 20 % bzw. 30 % GP gut der jeweiligen Korrelationskurve zuordnen lassen, gibt es in der Gruppe mit 40 % GP-Anteil zwei sogenannte

Ausreißer. Diese liegen mit im Vergleich zu den Druckfestigkeiten unerwartet hohen Werten für den E-Modul über der angenommenen Korrelationskurve.

Bild 4.13 zeigt die Korrelation zwischen E-Modul und Druckfestigkeit für AKR-geschädigte Proben mit einem GP-Anteil von 30 bzw. 40 %. Zum Vergleich sind die Werte mit der entsprechenden Kurve für die jeweilig passende Gruppe der ungeschädigten Proben aufgeführt. Während A mit 18300 (GP-Anteil 30 %) bzw. 17600 (GP-Anteil 40 %) konstant blieb, führte der Minderungsfaktor  $m < 1$  bei AKR-geschädigten Proben im Vergleich zu ungeschädigten Mörteln zu einer Absenkung der Korrelationskurve.

Bei einem GP-Anteil von 30 % wurde der kritische Grenzwert für die Dehnung von 0,5 mm/m mit ca. 0,6 mm/m nur knapp überschritten, so dass eine geringe AKR-Schädigung eingetreten ist. Der Minderungsfaktor  $m$  für die Korrelationskurve der geschädigten Prismen mit 30 % GP-Anteil wurde mit 0,98 berechnet.

Ähnlich verhält es sich mit Prismen, die 40 % GP enthielten. Auch hier trat eine AKR-Schädigung ein, die aber aufgrund des größeren GP-Anteils zu höheren Dehnungen und damit verbunden einer größeren Schädigung führte. Als mittlere Schädigung wurde ein Dehnungswert von ca. 1,5 mm/m definiert, für den der Minderungsfaktor  $m = 0,95$  gilt. Ein hoher Schädigungsgrad ist bei Dehnungswerten von ca. 2,5 mm/m gegeben und drückt sich in  $m = 0,90$  aus.



**Bild 4.13:** Korrelation des dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit für AKR-geschädigte Proben in Abhängigkeit von deren Anteil an GP

Auch wenn die Korrelation des E-Moduls mit der Druckfestigkeit anhand eines stark vereinfachten Modells erfolgte, so werden doch die Abhängigkeiten der beiden Größen



und deren Einflussfaktoren deutlich. Wenn es gelingt, das Modell durch weitere Untersuchungen zu verfeinern, ließe sich zukünftig anhand des zerstörungsfrei ermittelten E-Moduls und in Abhängigkeit von der Zusammensetzung direkt auf die (Rest)-Druckfestigkeit der Proben schließen. Da die Korrelationskurven sehr flach verlaufen, würde aber der Fehler der so ermittelten Druckfestigkeit auf den Einzelfall bezogen relativ hoch sein.

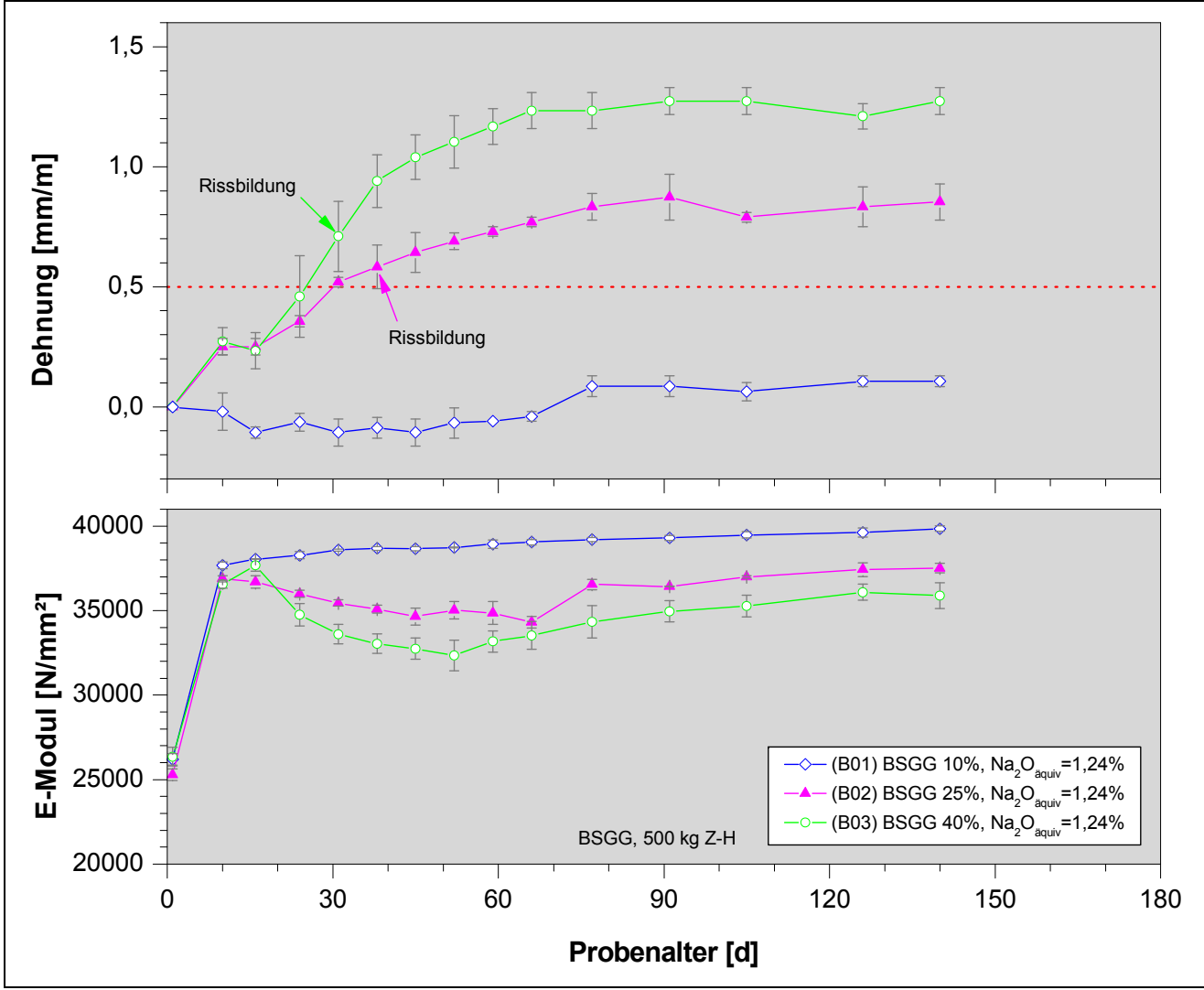
### 4.3 BOROSILIKATGLASGRANULAT

Auf die Untersuchung des Borosilikatglasgranulat (BSGG) mittels Mörtelschnelltest wurde verzichtet, da Borosilikatglasscherben sicher alkalireaktiv sind und derzeit als Standardmaterial zum Nachweis einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion gelten.

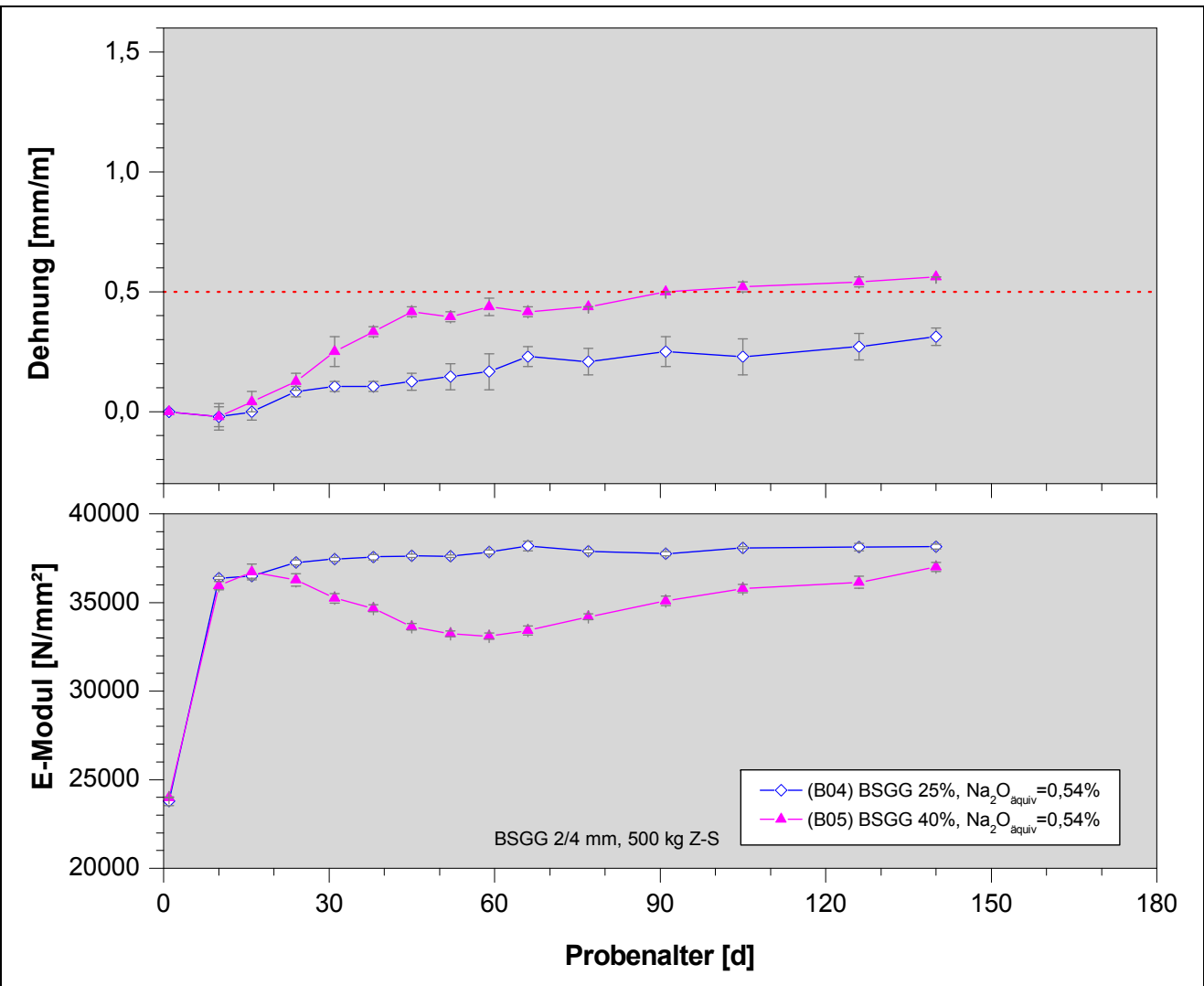
Im Folgenden wurden Mörtelmischungen mit unterschiedlichen Anteilen BSGG der Körnung 2/4 mm hergestellt, wobei sowohl ein alkalireicher als auch ein alkaliarmer Zement zum Einsatz kamen. Alle Rezepturen enthielten 500 kg Zement / m<sup>3</sup> Mörtel und entsprachen einem Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis von 1:3, mit einem Wasser-Zement-Wert von 0,5.

Erwartungsgemäß wiesen Probekörper, die mit BSGG der Körnung 2/4 mm und einem alkalireichen Zement hergestellt wurden, einen Dehnungsverlauf auf, bei dem die Dehnung umso größer ausfiel, je höher der Anteil an BSGG war (Diagramm im Bild 4.14). Dabei erreichte die Mischung mit 10 % BSGG (B01) nicht den kritischen Grenzwert und zeigte am Ende des Untersuchungszeitraumes, im 5. Monat, eine maximale Dehnung von 0,1 mm/m. Die Mörtel mit 25 % (B02) bzw. 40 % BSGG (B03) erreichten dagegen schon im 1. Monat den kritischen Grenzwert und entwickelten bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes eine maximale Dehnung von 0,85 mm/m bei B02 bzw. 1,27 mm/m bei B03 (siehe auch Bild 4.16, S.76). Makroskopisch erkennbare Haarrisse infolge Dehnung bildeten sich bei den Proben B02 und B03 relativ früh ab spätestens dem 40. Tag.

Der E-Modul aller Probekörper entwickelte sich analog zu deren Dehnung. Zunächst wiesen alle Mörtel nach 7 Tagen einen  $E_{\text{dyn}}$  von ca. 37000 N/mm<sup>2</sup> auf. Die geringfügigen Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Anteile an BSGG zurück zu führen, da die Art und Menge der verwendeten Körnung den E-Modul maßgeblich mit beeinflusst. Bei der ungeschädigten Probe B01 nahm der E-Modul auch nach dem Erreichen des 7-Tage-Wertes noch zu und stieg wegen der fortschreitenden Zementhydratation von 37680 auf 39860 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Mischungen B02 und B03 fiel der E-Modul innerhalb der ersten 2 Monate auf 34300 N/mm<sup>2</sup> (25 % BSGG) bzw. 32350 N/mm<sup>2</sup> (40 % BSGG) und stieg im Folgenden wieder an, blieb im Fall von Probe B03 mit 35890 N/mm<sup>2</sup> aber unter dem 7-Tage-Wert und steigerte sich bei B02 auf 37520 N/mm<sup>2</sup>, wobei der 7-Tage-Wert übertroffen wurde. Die fortschreitende Zementhydratation und die damit verbundene „Ausheilung“ von Mikrorissen im Gefüge überlagerten die AKR-Schädigung und die Festigkeit der Probekörper nahm wieder zu, nachdem die Dehnung nicht mehr im anfänglichen Maß anstieg (nach ca. 2 Monaten).



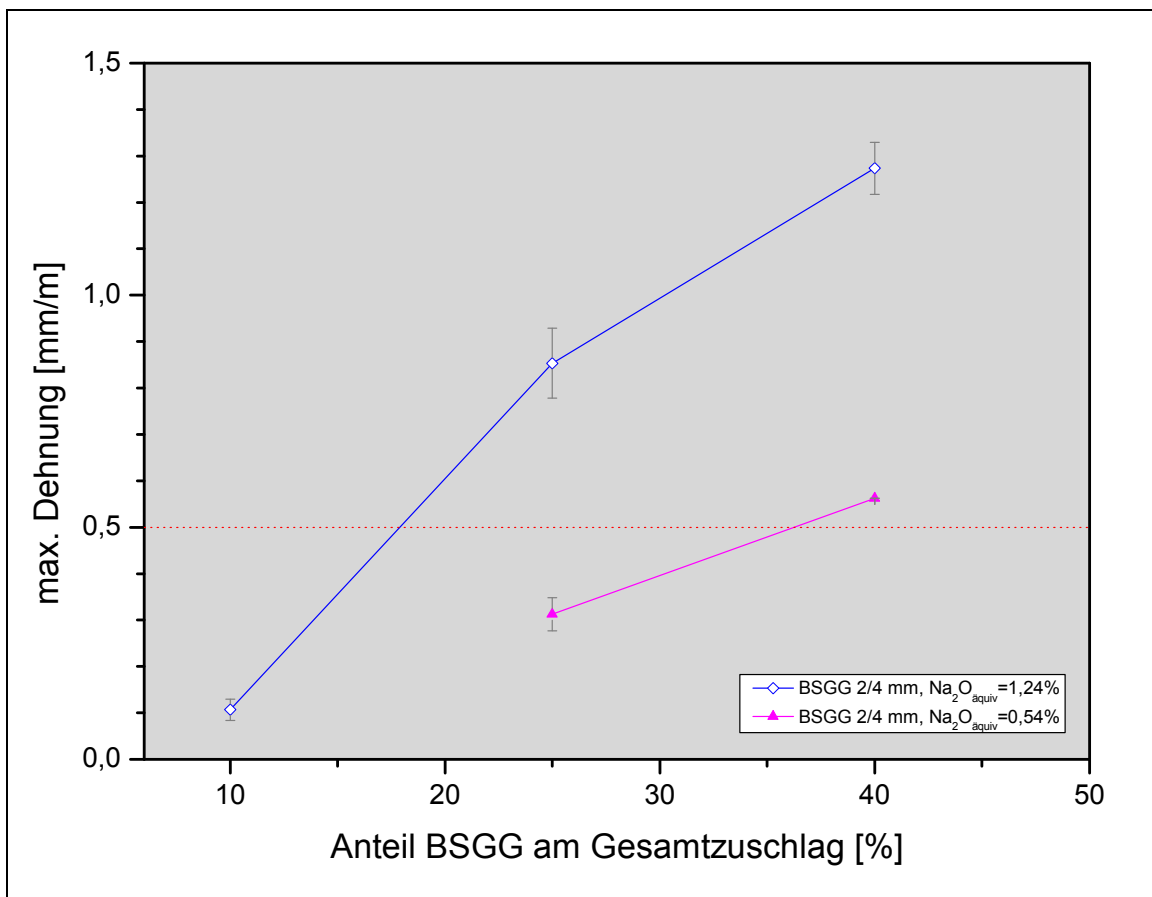
**Bild 4.14:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit BSGG der Körnung 2/4 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalreichen Zementes mit einem natürlichen  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 1,24\%$



**Bild 4.15:** Dehnungsverlauf und dynamischer E-Modul von Mörtelmischungen mit BSGG der Körnung 2/4 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkaliarmen Zementes mit einem natürlichen  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 0,54\%$

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen mit einem alkaliarmen Zement und BSGG-Anteilen von 25 und 40 % sind in Bild 4.15 wiedergegeben. Anhand der dargestellten Dehnungsverläufe wird die hohe Empfindlichkeit von Borosilikatglasscherben gegenüber Alkalien deutlich und bestätigt Untersuchungen des VDZ [SB-AIF]. Während Mörtel B04 mit 25 % BSGG innerhalb des Beobachtungszeitraumes unter dem kritischen Dehnungsgrenzwert blieb und auch die Entwicklung des E-Moduls nicht auf eine innere Schädigung schließen ließ, so erzielten die Probekörper der Mischung B05 mit 40 % BSGG innerhalb von 5 Monaten eine maximale Dehnung von 0,56 mm/m (siehe auch Bild 4.16). Auch der E-Modul zeigte nach Erreichen des 7-Tage-Wertes den typischen Abfall, der auf eine Schädigung infolge AKR schließen lässt.

Zusammenfassend sind die maximalen Dehnungen der Mörtel mit BSGG in Abhängigkeit von dessen Anteil am Gesamtzuschlag und vom Alkaliäquivalent in Bild 4.16 dargestellt:

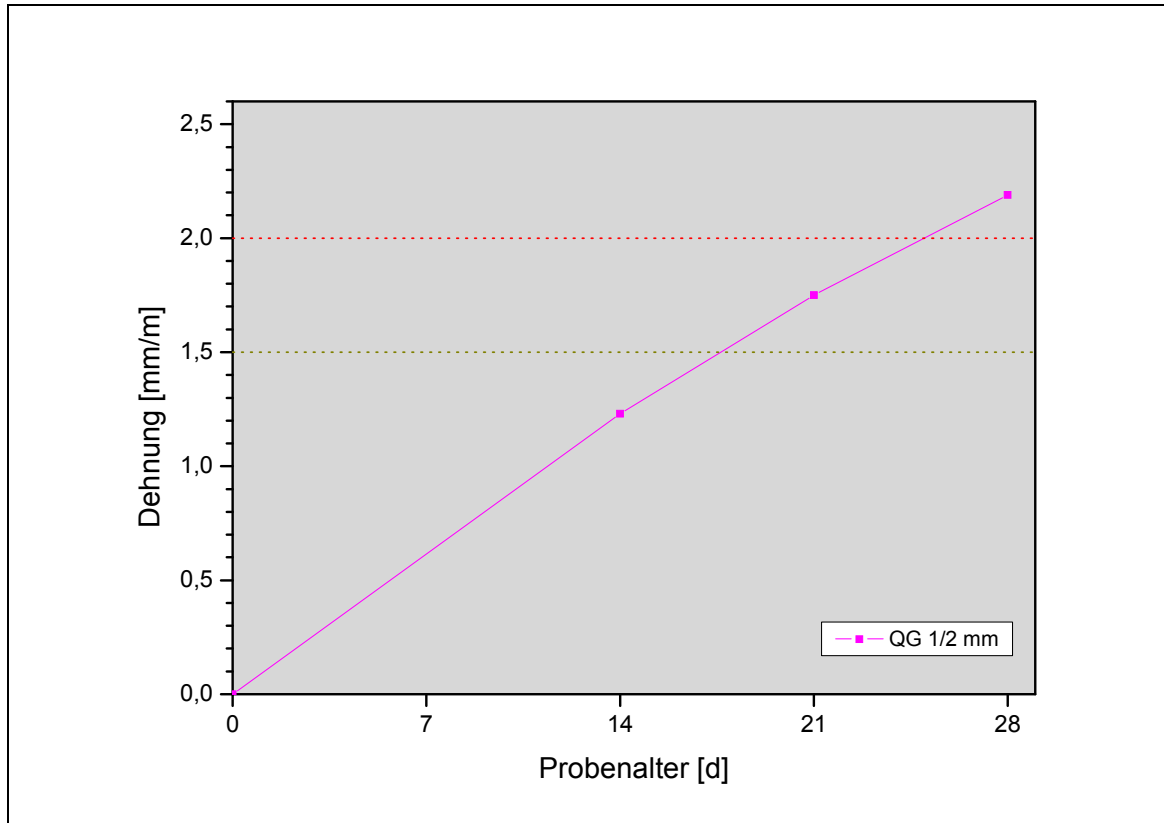


**Bild 4.16:** Einfluss des BSGG-Anteiles am Gesamtzuschlag auf die maximale Dehnung von Mörtelprismen in Abhängigkeit vom Alkaligehalt

Werden Borosilikatglasscherben als alkalireaktives Material in Performancetests verwendet, muss beachtet werden, dass das Dehnungspotential der Probekörper auch bei geringem Alkaliangebot kritische Werte überschreiten kann; d.h., falsch positive Ergebnisse sind nicht auszuschließen.

## 4.4 QUARZGLASGRANULAT

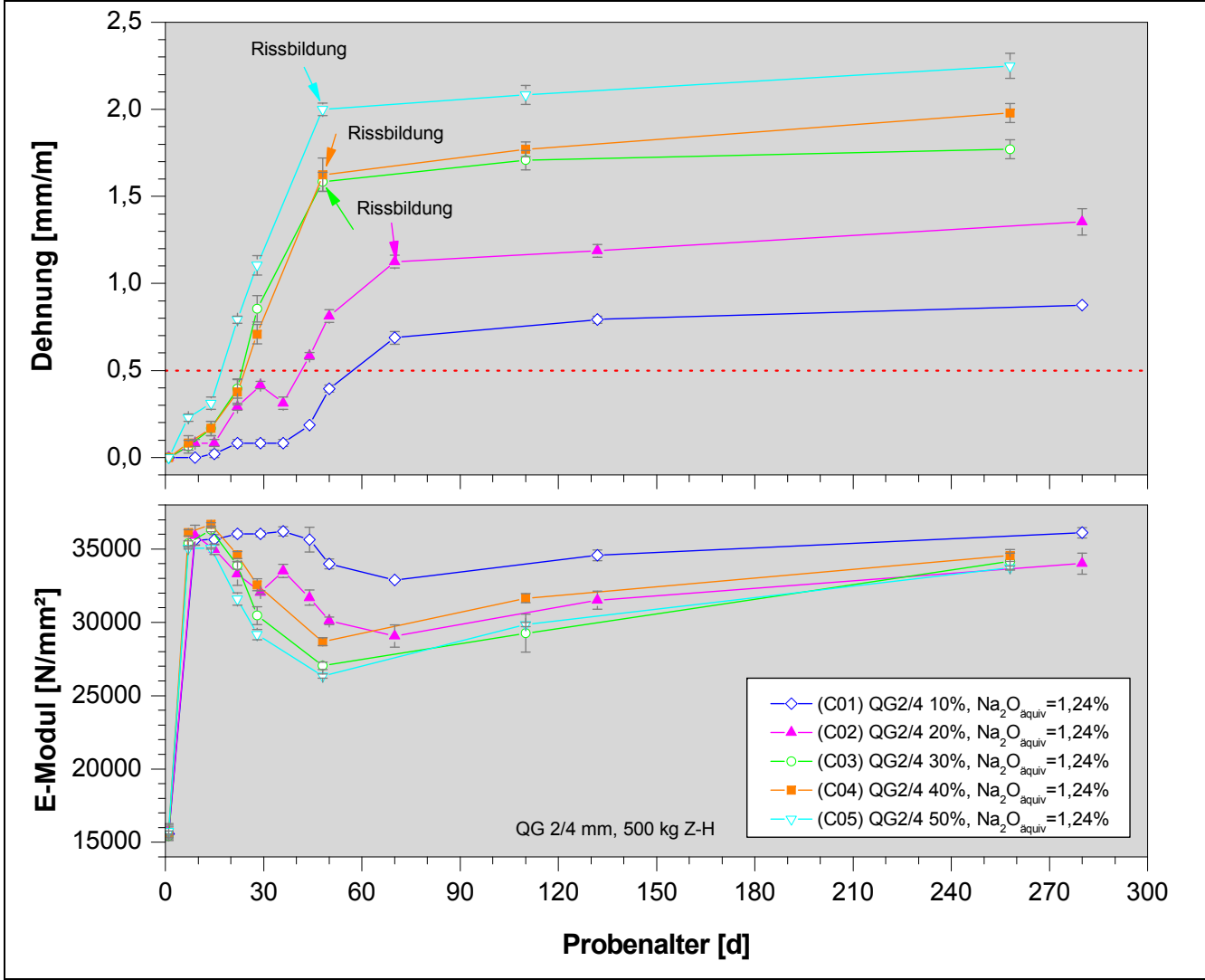
Das zu untersuchende Quarzglasgranulat (QG) wurde in der Körnung 1/2 mm einem Mörtelschnelltest unterzogen. Die Dehnungskurve stieg im Verlauf von 28 Tagen nahezu linear an und überschritt mit 2,19 mm/m den kritischen Grenzwert von 2 mm/m (siehe Diagramm im Bild 4.17). Damit ist die Körnung eindeutig alkalireaktiv.



**Bild 4.17:** Mörtelschnelltest für QG der Körnung 1/2 mm

Für die Performancetests wurde das zu untersuchende Quarzglasgranulat (QG) in den Körnungen 2/4 und 4/8 mm verwendet und in unterschiedlichen Anteilen gegen die inerte Gesteinskörnung ausgetauscht. Die mit QG hergestellten Mörtelmischungen enthielten jeweils 500 kg Zement je m<sup>3</sup> Mörtel, bei einem Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis von 1:3 und einem Wasser-Zement-Wert von 0,5.

In einer ersten Versuchsserie wurde die QG-Körnung 2/4 mm (in den Anteilen 10, 20, 30, 40 und 50 %) unter Verwendung eines alkalireichen Zementes getestet. Die Ergebnisse für Dehnungsverlauf und E-Modul-Entwicklung sind in Bild 4.18 wiedergegeben.



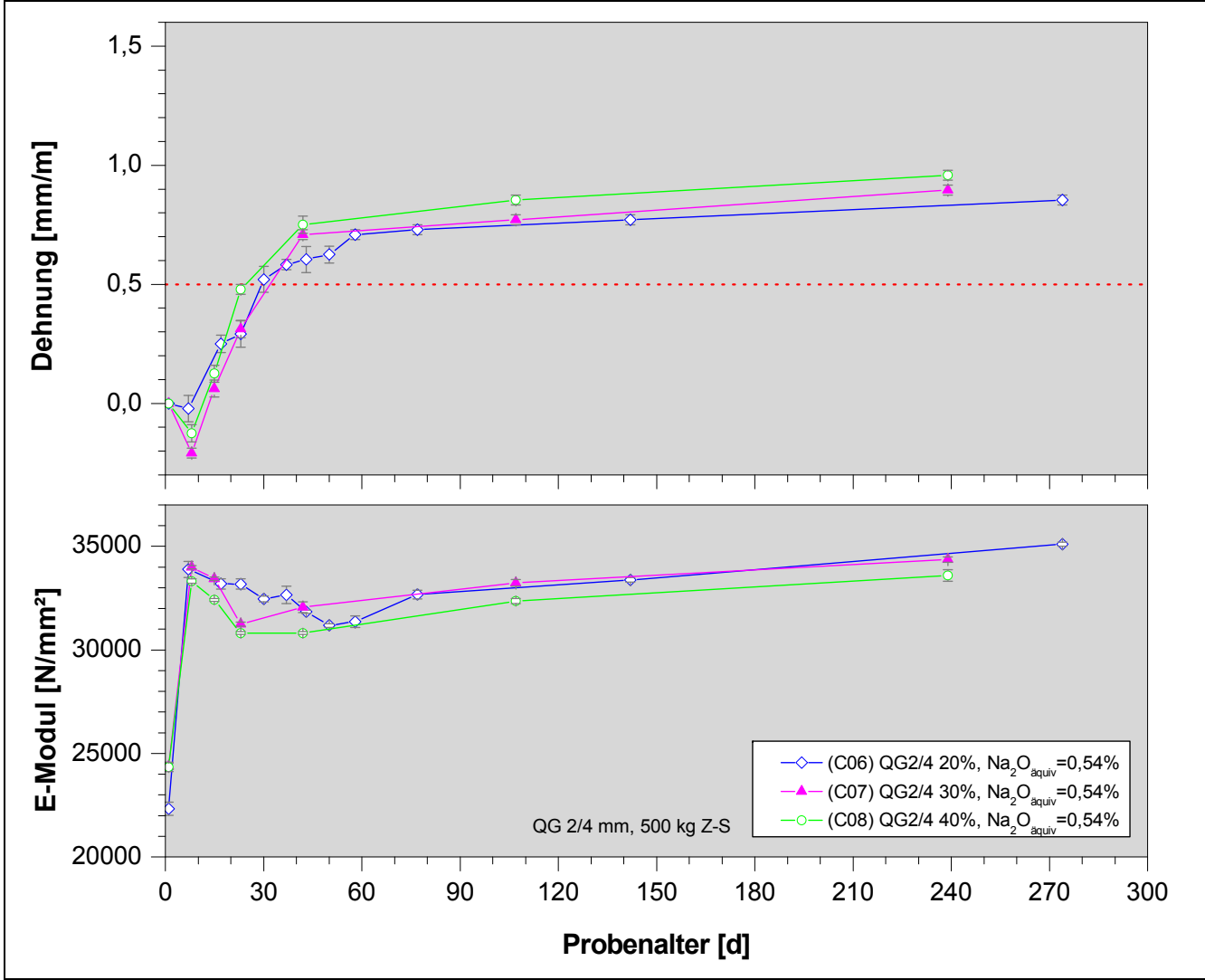
**Bild 4.18:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit QG der Körnung 2/4 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalreichen Zementes mit einem natürlichen  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 1,24\%$

Für alle untersuchten Mischungen gilt, dass nach spätestens 2 Monaten der kritische Dehnungswert überschritten wurde. Insgesamt fiel die Dehnung der Probekörper umso größer und der Anstieg der Kurve umso steiler aus, je mehr QG im Mörtel enthalten war. Ein pessimaler Gehalt an QG war für die untersuchten Anteile bis 50 % nicht erkennbar (siehe auch Bild 4.21). Die maximalen Dehnungen am Ende des Untersuchungszeitraumes lagen demnach für die Mischung mit 10 % QG (C01) bei ca. 0,9 mm/m und bei ca. 2,3 mm/m für den Mörtel mit 50 % QG (C05). Der größte Dehnungszuwachs fand dabei in den ersten 2 Monaten (Mörtel C03 bis C05) bzw. den ersten 3 Monaten (C01 und C02) statt und ging jeweils mit einer Rissbildung der Probekörper einher. Danach flachte die jeweilige Kurve ab, stieg aber bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes (ca. 10 Monate) weiter an.

Auch für die Entwicklung des E-Moduls gilt, dass der anfängliche Abfall von  $E_{\text{dyn}}$  umso größer ausfiel, je höher der Anteil an QG im Mörtel war. Zunächst steigen die E-Moduln aller Mischungen innerhalb der ersten 7 Tage von ca. 15000 auf etwa 36000 N/mm<sup>2</sup> an. Bei Mischung C01 mit dem geringsten Anteil an QG stieg dieser über den ersten Monat hinaus zunächst auch noch weiter an, von 35600 auf 36040 N/mm<sup>2</sup>. Danach fiel die Kurve bis etwa zur Mitte des 3. Monats auf 32880 N/mm<sup>2</sup> ab. Zu diesem Zeitpunkt flachte auch die Dehnungskurve des Probekörpers ab und der E-Modul stieg wieder an. Am Ende des Untersuchungszeitraumes war der E-Modul gegenüber dem 7-Tage-Wert erhöht und lag bei 36110 N/mm<sup>2</sup>. Die Ausheilungsvorgänge im Gefüge sowie die fortschreitende Hydratation überlagerten in diesem Fall die Schädigung infolge AKR, so dass die Dehnung über den Grenzwert hinaus in diesem Fall langfristig keine nachteiligen Folgen auf die Festigkeit hatte.

Der Mörtel C05 mit dem höchsten Gehalt von 50 % QG hatte auch die größte Minderung des E-Modul aufzuweisen, welcher nach 48 Tagen nur noch 26120 N/mm<sup>2</sup> betrug. Der daraufhin folgende Anstieg von  $E_{\text{dyn}}$  korrelierte auch hier mit der flacher werdenden Dehnungskurve und lag am Ende des Untersuchungszeitraumes bei 33740 N/mm<sup>2</sup>, der 7-Tage-Wert wurde hier also nicht erreicht.

Die Entwicklung der E-Moduln der Mischungen C02 bis C04 verlief qualitativ ähnlich wie bei der am meisten geschädigten Probe C05. Am Ende des Untersuchungszeitraumes lagen die erreichten Werte mit 34000 N/mm<sup>2</sup> (C02) nach ca. 9,5 Monaten und 34140 N/mm<sup>2</sup> (C03) bzw. 34550 N/mm<sup>2</sup> (C04) nach ca. 8,5 Monaten nah beieinander. Für alle untersuchten Proben gilt daher, dass die Gefügeschädigungen infolge AKR am Ende des Beobachtungszeitraumes mittels dynamischem E-Modul zwar durchaus darstellbar waren, dass sich die Messwerte aber nicht mehr in dem Maße unterschieden, wie dies in den ersten 3 Untersuchungsmonaten der Fall war.



**Bild 4.19:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit QG der Körnung 2/4 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkaliarmen Zementes mit einem natürlichen  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 0,54\%$



Weiterhin wurde die QG-Körnung 2/4 mm in den Anteilen 20 % (C06), 30 % (C07) sowie 40 % (C08) und in Kombination mit einem alkaliarmen Zement getestet. Die Ergebnisse für Dehnungspotential und E-Modul-Entwicklung sind im Diagramm in Bild 4.19 aufgeführt.

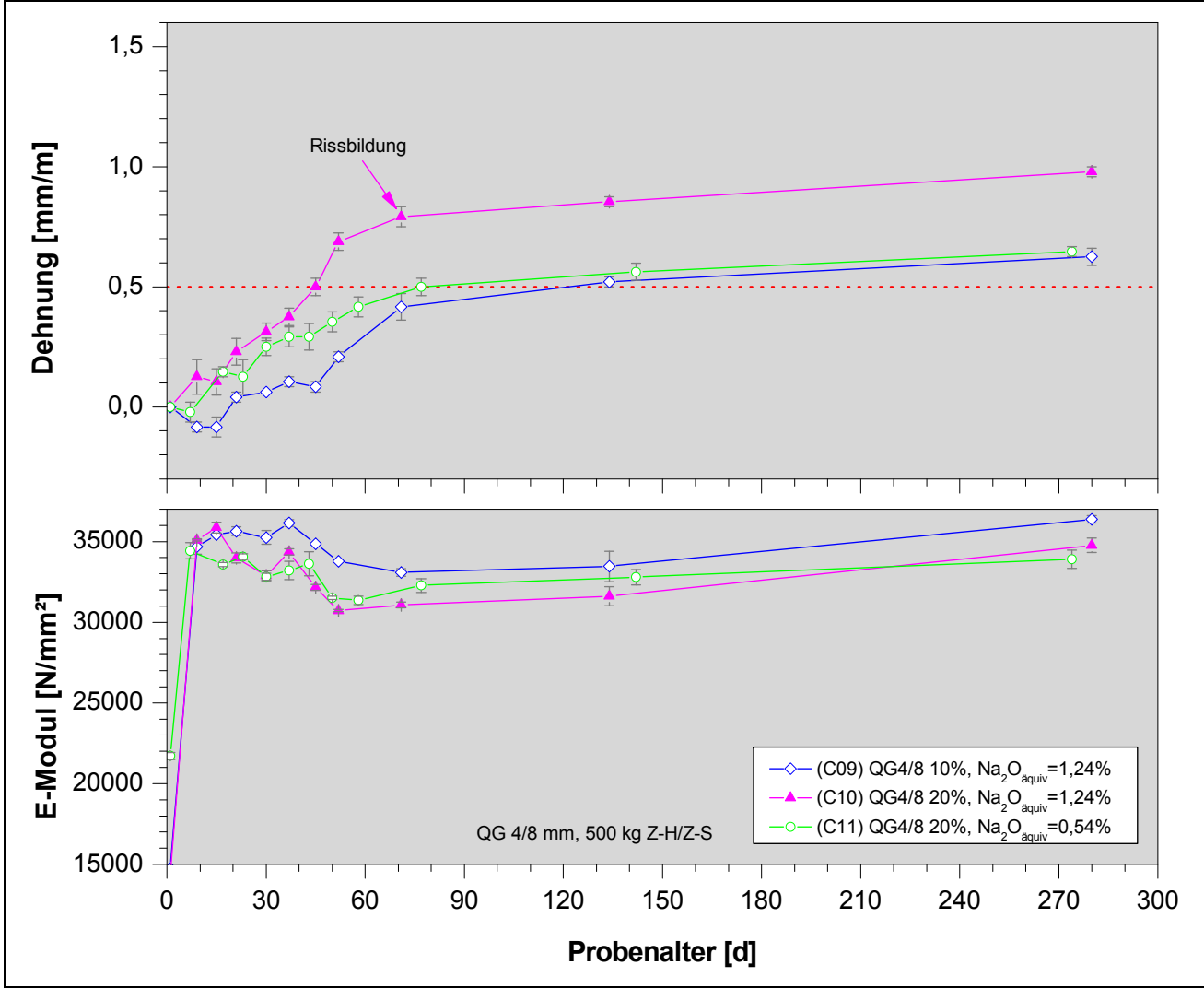
Alle Mischungen überschritten trotz des geringen Alkaliangebotes innerhalb des ersten Untersuchungsmonats den kritischen Dehnungsgrenzwert. In diesem Zeitraum lagen die Messwerte aller Proben für die Dehnung relativ nah beieinander. Doch auch darüber hinaus sind die Unterschiede im Dehnungspotential nicht so signifikant wie bei den Mischungen mit alkalireichem Zement. Allerdings erreichte auch in dieser Versuchsreihe der Mörtel mit dem höchsten Anteil an QG den maximalen Dehnungswert (siehe auch Bild 4.21). So sind dies für C06 0,85 mm/m nach 9 Monaten und 0,9 mm/m (C07) bzw. 0,96 mm/m (C08) nach 8 Monaten, mit jeweils noch steigender Tendenz.

Die E-Moduln der untersuchten Probekörper zeigten ebenfalls den für AKR-geschädigte Mörtel typischen Verlauf mit dem E-Modul-Abfall nach 7 Tagen und dem Wiederanstieg nach ca. 1 bis 2 Monaten.

Quarzglasgranulat der Korngröße 2/4 mm zeigte damit eine überhöhte Empfindlichkeit gegenüber Alkalieinwirkung, welche die des Borosilikatglasgranulates noch übertraf. Bei der Verwendung von QG 2/4 mm in Mörtelmischungen wurde auch dann eine Dehnung der Probekörper provoziert, wenn ein alkaliarmer Zement Verwendung fand.

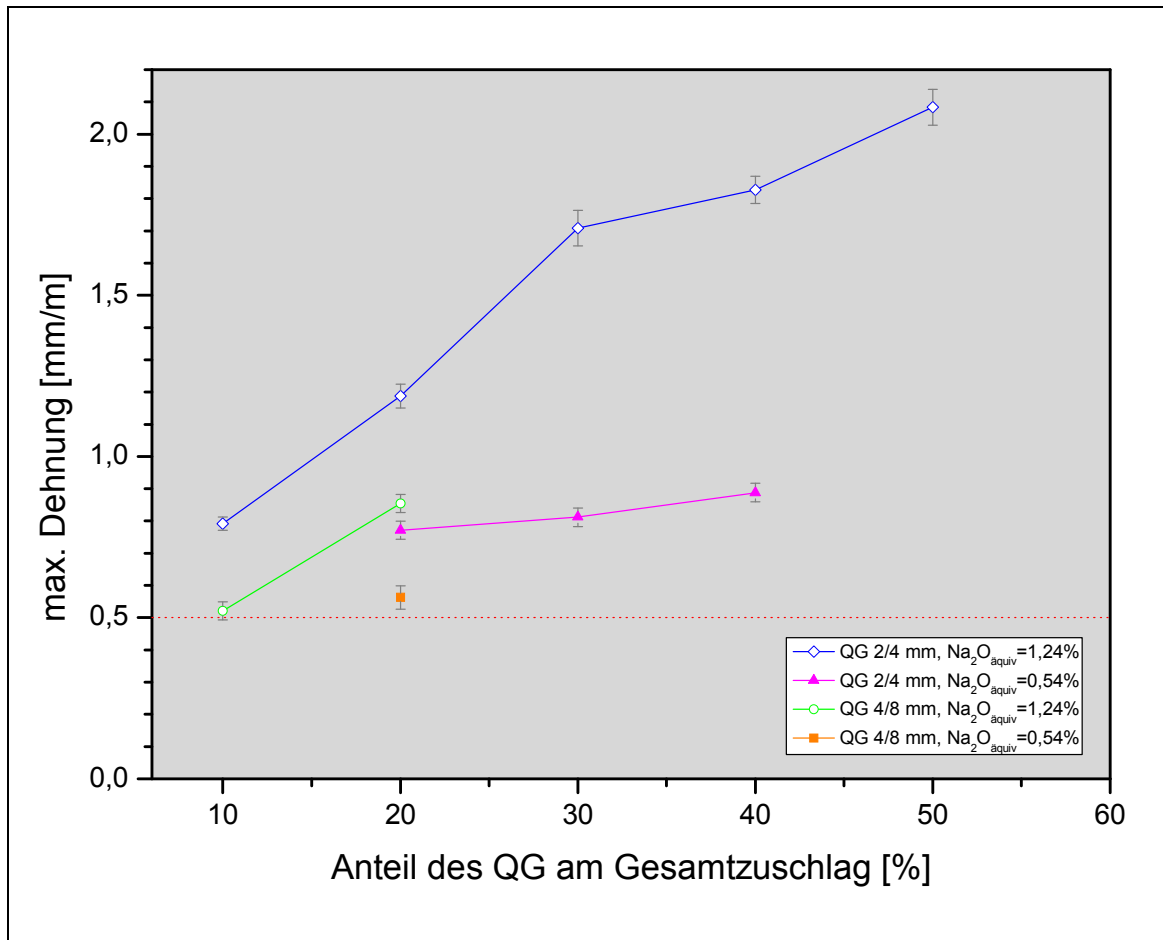
Das Reaktionspotential der QG-Körnung 4/8 mm wurde ebenfalls getestet. Dafür wurden Mörtel mit je 10 % (C09) bzw. 20 % QG (C10) und einem alkalireichen Zement sowie mit 20 % QG und einem alkaliarmen Zement (C11) hergestellt. Die Ergebnisse sind im Diagramm in Bild 4.20 zusammengefasst.

Sowohl die Mischungen mit alkalireichem als auch mit alkaliarmem Zement überschritten die kritische Dehnung, wenn auch später, als die jeweilige Vergleichsmischung mit der QG-Körnung 2/4 mm. Dabei erreichte Mörtel C10 eine maximale Dehnung von ca. 1 mm/m, während C09 und C11 mit 0,63 bzw. 0,65 mm/m als maximaler Dehnung im 10. Untersuchungsmonat fast gleichauf lagen (siehe auch Bild 4.21). Probe C09 überschritt erst nach 5 Monaten den kritischen Grenzwert, während dies bei C11 schon innerhalb des 3. Monats passierte.



**Bild 4.20:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit QG der Körnung 4/8 mm in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalireichen und eines alkaliarmer Zementes

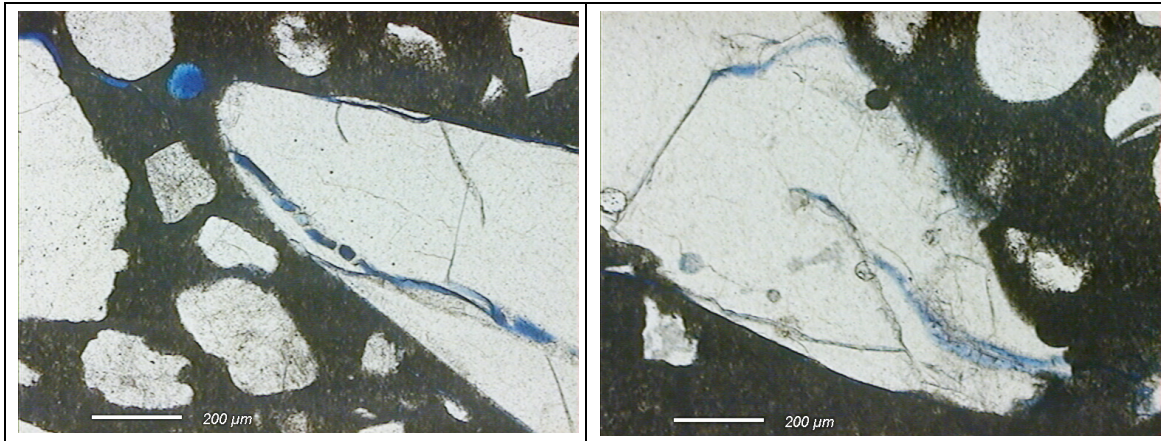
Zusammenfassend sind die maximalen Dehnungen der Proben mit QG in Abhängigkeit von dessen Anteil am Gesamtzuschlag, der Korngröße und vom Alkaliäquivalent in Bild 4.21 dargestellt:



**Bild 4.21:** Einfluss des QG-Anteils am Gesamtzuschlag auf die maximale Dehnung von Mörtelprismen in Abhängigkeit von der Korngröße und vom Alkaligehalt

Auch bei der E-Modul-Entwicklung der Mörtel C09 bis C11 (Bild 4.20) wurden die Folgen der AKR sichtbar und so fiel der Wert bei allen Probekörpern zwischenzeitlich ab. Dabei ist dies für die Rezeptur mit alkaliarmem Zement (C11) schon nach Erreichen des 7-Tage-Wertes zu beobachten. Bei Mörtel C09 fällt der E-Modul ähnlich wie die Vergleichsmischung mit C01 mit 10 % QG 1/2 mm erst nach ca. 40 Tagen und bei Rezeptur C10 geschah dies nach 14 Tagen. C09 mit der geringsten maximalen Dehnung zeigte auch den höchsten E-Modul am Ende des Untersuchungszeitraumes, welcher mit 36380 N/mm<sup>2</sup> deutlich über dem 7-Tage-Wert von 35430 N/mm<sup>2</sup> lag. Dass der Endwert des E-Moduls nach 10 Monaten bei C10 mit dem größeren Dehnungspotential auch höher ausfiel als bei C11, dessen Dehnung geringer war, ist dem Umstand geschuldet, dass die Verwendung von verschiedenen Zementen eine unterschiedliche E-Modul-Entwicklung bedingt. Der Einfluss der AKR wird allerdings in jedem Fall deutlich: Bei geringer AKR-Schädigung, bedingt durch ein niedrigeres Alkaliangebot oder einen geringeren Anteil an QG, fiel auch die zwischenzeitliche Minderung des E-Moduls kleiner

aus und die anschließende „Erholung“ näherte den E-Modul seinem 7-Tage-Wert wieder an bzw. überstieg diesen sogar. So wurden die Mikroschäden infolge AKR im Zementsteingefüge mit der Zeit „ausgeheilt“ bzw. von der fortschreitenden Zementsteinhydratation überlagert und wirkten sich langfristig nicht festigkeitsmindernd auf die untersuchten Probekörper aus.



**Bild 4.22:** Dünnschliff, 5fache Vergrößerung: QG der Körnung 2/4 mm (Mörtel C05) mit Riss, der sich in der Zementsteinmatrix fortsetzt (nach links oben)

**Bild 4.23:** Dünnschliff, 5fache Vergrößerung: QG der Körnung 2/4 (Mörtel C02) mit sich auflösender Randzone infolge Angriff durch Alkalien

Mikroskopisch lässt sich die AKR anhand der Rissbildung im Gefüge nachweisen. Bild 4.22 zeigt ein gerissenes Quarzglaskorn, von dem ausgehend sich der Riss auch in die Zementsteinmatrix fortsetzt (linke obere Ecke). Außerdem lösen sich die Randzonen der Quarzglaskörner infolge Alkaliangriff auf (Bild 4.23).

Quarzglaskornulat der Körnungen 2/4 bzw. 4/8 mm zeigte also eine AKR durch eine kritische Dehnung der Probekörper und einen Abfall des E-Moduls zwar zuverlässig an, jedoch reagierte es auch bei Verwendung eines alkaliarmen Zementes innerhalb nur weniger Wochen mit einer Dehnung über den Grenzwert hinaus, so dass es als Referenzkörnung wegen seiner übersensiblen Reaktivität nicht geeignet ist.

## 4.5 BOROSILIKATGLASPERLEN AUS INDUSTRIELLER HERSTELLUNG

Für die Untersuchung der Borosilikatglasperlen (BSGP) aus industrieller Herstellung sind Mörtelmischungen mit jeweils 500 kg Zement (Z-H, Z-S, Z-V) je m<sup>3</sup> Mörtel, einem Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis von 1:3 und einem Wasser-Zement-Wert von 0,5 hergestellt worden.

### 4.5.1 UNBEHANDELT

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Mörtelmischungen mit einem alkalireichen und einem alkaliarmen Zement hergestellt, bei denen 10 bzw. 25 % der inerten Gesteinskörnung durch BSGP wie vom Hersteller bezogen ersetzt worden sind.

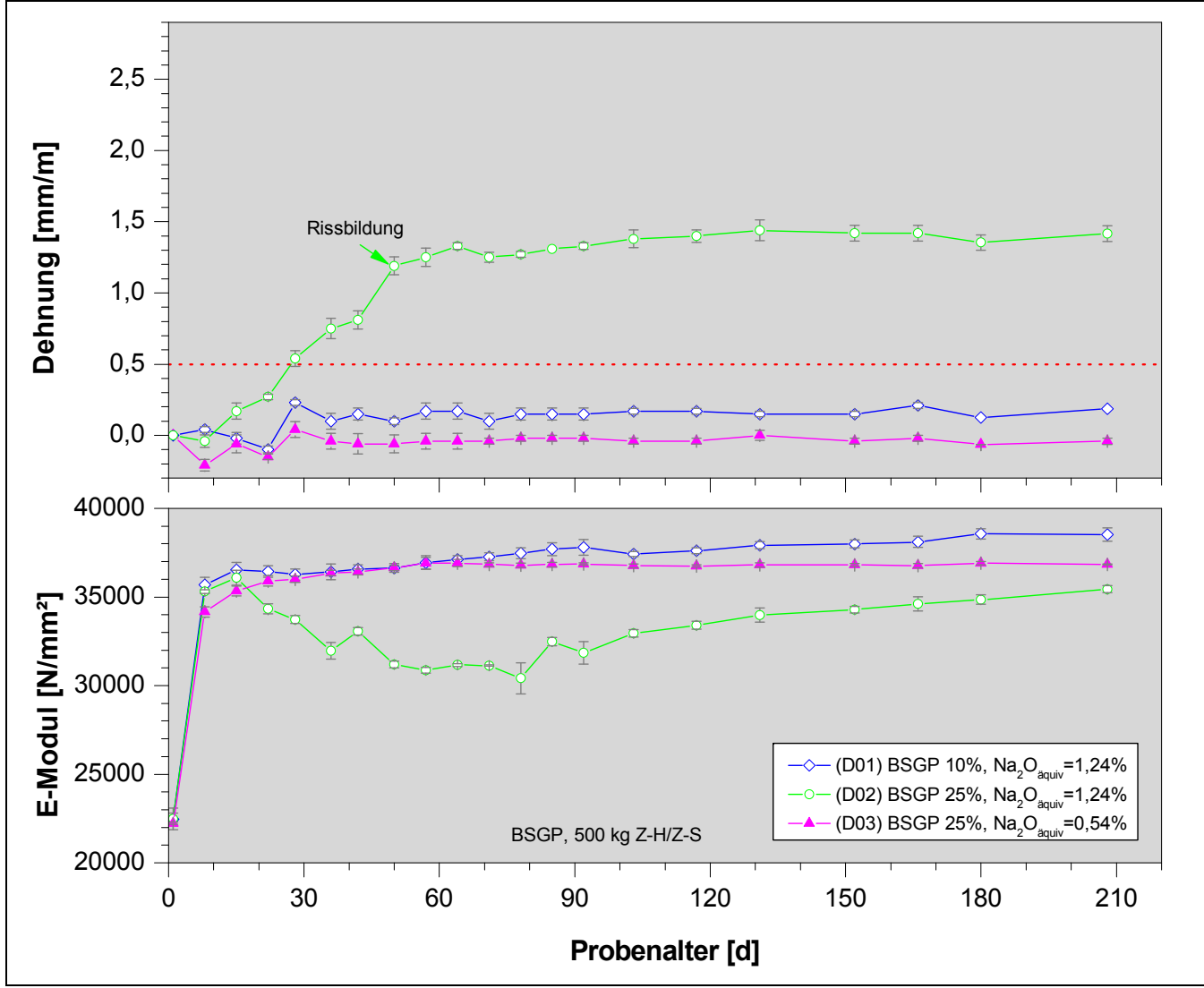
Der Dehnungsverlauf sowie die Entwicklung des E-Moduls sind in Bild 4.24 aufgezeigt. Demnach entwickelte sich die Dehnungskurve der Mischung D02 mit einem Anteil von 25 % BSGP und dem Zement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 1,24 \%$  so, dass bereits nach 28 Tagen der kritische Wert überschritten wurde. Nach 60 Tagen war die Dehnung weitestgehend abgeschlossen und lag bei ca. 1,3 mm/m. Im weiteren Verlauf der Untersuchung stieg diese noch geringfügig an und erreichte einen Maximalwert von ca. 1,4 mm/m. Nach ca. 45 Tagen wurde die Dehnung des Probekörpers auch durch eine beginnende Rissbildung an der Oberfläche offensichtlich. Der Zusatz von nur 10 % BSGP (D01) reichte dagegen nicht aus, um eine kritische Dehnung zu provozieren. Auch hier erfolgte die maximale Dehnung innerhalb des ersten Monats des Untersuchungszeitraumes und lag bei ca. 0,25 mm/m.

Wurde der alkaliarme Zement mit  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 0,54 \%$  in Kombination mit 25 % BSGP verwendet (D03), so fand praktisch keine Dehnung statt.

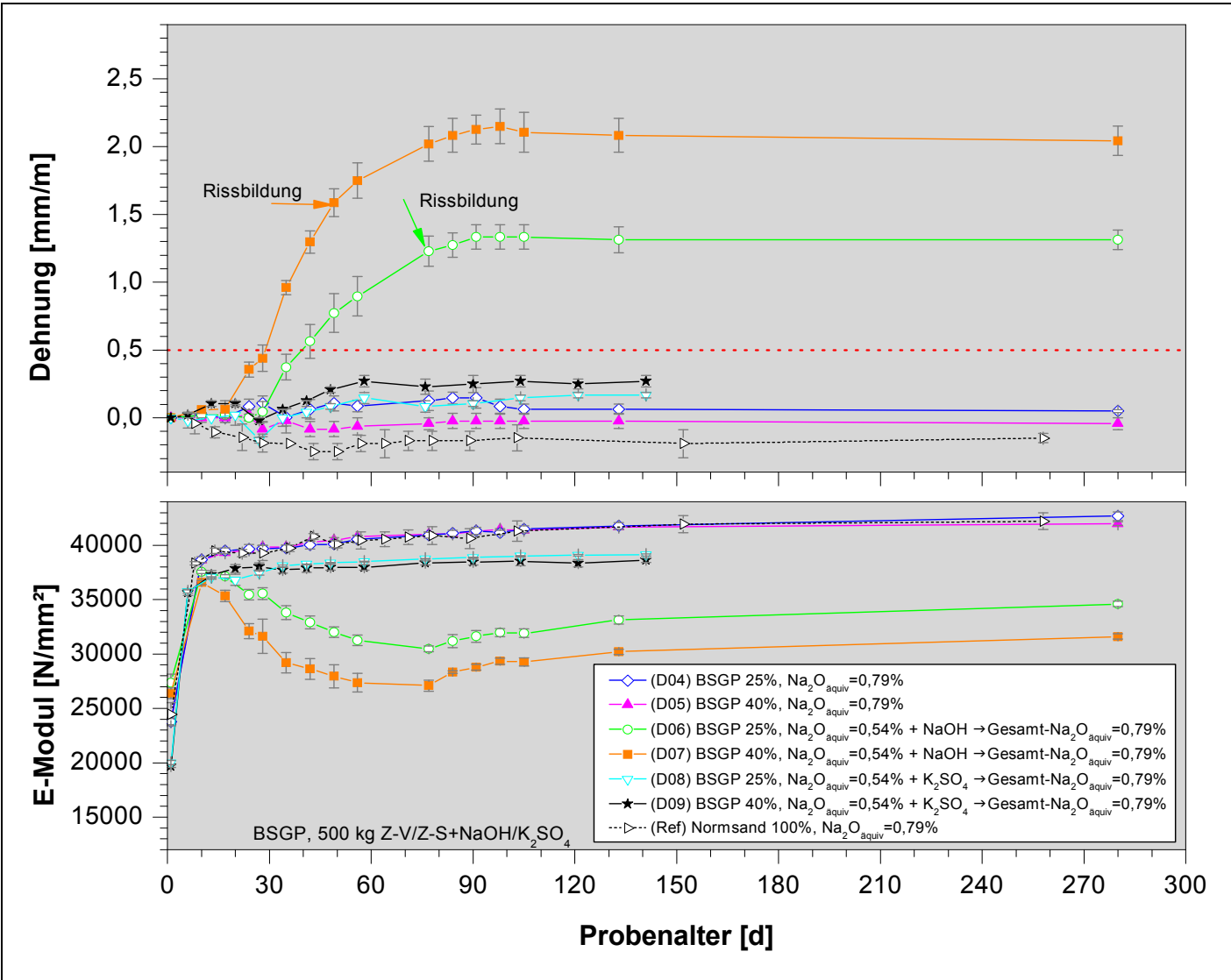
Der E-Modul erhöhte sich bei den beiden Mischungen ohne Dehnungspotential ab dem 7. Tag noch geringfügig von 35700 auf 38100 N/mm<sup>2</sup> (D01) bzw. von 34200 auf 36800 N/mm<sup>2</sup> (D03), was auf die fortschreitende Hydratation zurückzuführen ist. Bei der alkaligeschädigten Probe (D02) war dagegen ab dem 15. Tag ein Abfall des E-Moduls von 36100 auf 30400 N/mm<sup>2</sup> um den 80. Tag zu verzeichnen. Danach stieg er trotz fortschreitender Reaktion (wie aus der zunehmenden Dehnung ersichtlich) auch über den 3. Monat hinaus wieder an. Die AKR-Schädigung wirkte sich also zunächst mindernd auf die Festigkeit aus. Dieser Prozess verlangsamte sich zwischen dem 2. und 3. Monat, danach gewann die Probe wieder an Festigkeit, was auf Ausheilungsvorgänge im Gefüge zurückzuführen ist. Dennoch blieb der E-Modul am Ende des Untersuchungszeitraumes hinter dem des ungeschädigten Betons zurück und erreichte 34600 N/mm<sup>2</sup>.

Nachdem die BSGP in Abhängigkeit vom Alkaliäquivalent ihre grundsätzliche Eignung zum Nachweis einer AKR (Dehnung und Gefügeschädigung bei alkalireichem Zement und keine Dehnung und Gefügeschädigung bei alkaliarmen Zement) bewiesen hatten, wurde in einer folgenden Versuchsserie deren Reaktionspotential beim Einsatz eines Zementes mit einem natürlich vorhanden  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 % und einem Zement mit einem künstlich eingestellten  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 % ermittelt. Dafür wurde das Zugabewasser für den alkaliarmen Zement mit NaOH bzw. K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> beaufschlagt. Während NaOH insbesondere bei Mörtelschnelltests Verwendung findet (vgl. Abschnitt 2.3.1.1), um den Anteil an verfügbaren Alkalien zu erhöhen und damit ein mögliches Reaktionspotential einer potentiell reaktiven Körnung zu testen, ist K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eine im Zement natürlicherweise vorhandene Klinkerphase, die wesentlich dessen Alkaliäquivalent beeinflusst.

In allen Probemischungen dieser Serie war der absolute Gehalt an Alkalien mit 3,95 kg/m<sup>3</sup> Mörtel jedoch gleich und unterschied sich nur nach der Herkunft.



**Bild 4.24:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit BSGP in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalarmen und eines alkalireichen Zementes



**Bild 4.25:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit BSGP in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines Zementes mit natürlich vorhandenem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 0,79\%$  und eines Zementes mit eingestelltem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 0,79\%$  durch Zugabe von NaOH bzw.  $\text{K}_2\text{SO}_4$

Aus den in Bild 4.25 dargestellten Ergebnissen für Dehnungsverhalten und E-Modul-Entwicklung geht hervor, dass nur die Mischungen mit modifiziertem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  die Anzeichen einer AKR aufzeigten. Dies gilt jedoch nur für den Zusatz von NaOH. Bei zugesetztem  $\text{K}_2\text{SO}_4$  und Verwendung von 40 % BSGP blieb die Dehnung mit höchstens 0,27 mm/m deutlich unter dem kritischen Grenzwert, bei nur 25 % BSGP fiel die Dehnung mit 0,17 mm/m noch geringer aus. Bei den Rezepturen mit dem Zement, der ein natürlich vorhandenes  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 % aufwies, findet selbst bei einem BSGP-Anteil von 40 % vom Gesamtzuschlag praktisch keine Dehnung statt.

Für die Mörtelrezepturen mit dem Zement mit modifiziertem Alkaligehalt (0,54 % natürlich vorhandenes  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  mit zugesetztem NaOH für ein Gesamt- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 %) galt dies nicht. So erreichten die Mischungen mit 25 % BSGP (D06) bzw. 40 % BSGP (D07) maximale Dehnungen von 1,3 bzw. 2,2 mm/m und überschritten damit im 2. Monat nach Herstellungsdatum den kritischen Grenzwert. Die Probekörper der Rezeptur D07 zeigten dabei bereits nach 45 Tagen eine Rissbildung an der Oberfläche, die bei Mörtel D06 erst nach ca. 75 Tagen sichtbar wurde. Die Mörtel mit einem Anteil von nur 10 % BSGP wiesen keine Dehnung auf und sind in Bild 4.2.5 nicht mit aufgeführt.

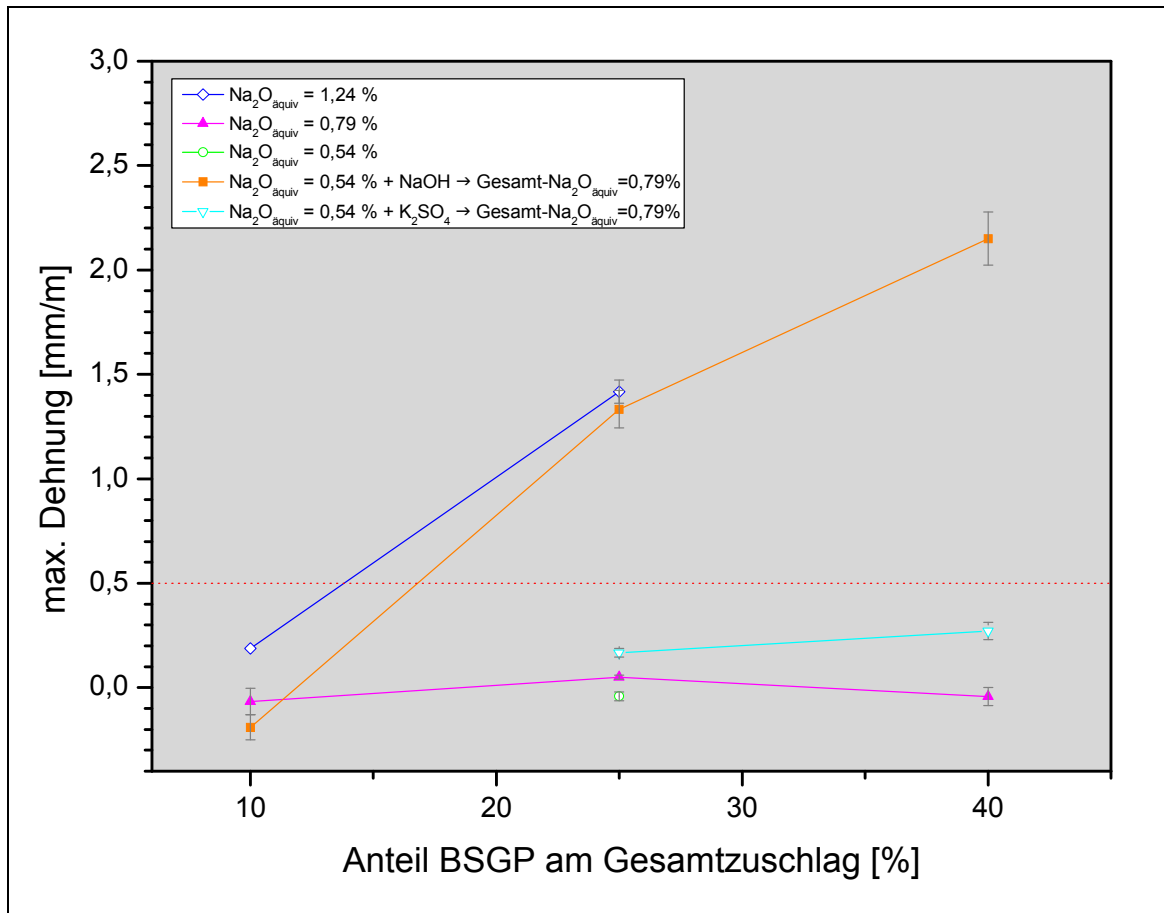
Zum Vergleich sind außerdem die Ergebnisse für Dehnung und E-Modul einer Referenzprobe (Ref) angegeben. Diese wurde aus einem Normmörtel unter Verwendung des Zementes mit geringem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 0,54 \%$ ) sowie zusätzlicher Gabe von NaOH zur Erhöhung des  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  (auf insgesamt 0,79 %) und Normsand (ohne Anteile an reaktiver Körnung) hergestellt. Während eine Dehnung des Referenzprobekörpers erwartungsgemäß nicht beobachtet werden konnte, zeigte die Entwicklung des E-Moduls den typischen Verlauf eines ungeschädigten Mörtels. Dieser überlagerte sich weitestgehend mit dem der Proben D04 und D05, die bei Verwendung eines Zementes mit natürlichem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 und Verwendung von BSGP keine Schädigung infolge AKR zeigten. Am Ende des Untersuchungszeitraumes lag der E-Modul der Mischungen D04 und D05 sowie der Referenzmischung bei ca. 41.000 N/mm<sup>2</sup>.

Bei den durch AKR geschädigten Proben mit zugesetzten NaOH und 25 % (D06) bzw. 40 % (D07) BSGP fiel der E-Modul nach 7 Tagen bis zum 3. Untersuchungsmonat auf 30500 N/mm<sup>2</sup> (D06) bzw. 27000 N/mm<sup>2</sup> (D07) ab und steigerte sich erst ab dem 4. Monat wieder. Am Ende des Untersuchungszeitraums blieben die E-Moduln mit 34.600 N/mm<sup>2</sup> (D06) und 31.600 N/mm<sup>2</sup> für (D07) aber deutlich zurück hinter den ungeschädigten Proben zurück.

Die E-Modul-Entwicklung der Proben D08 und D09 mit zugesetztem  $\text{K}_2\text{SO}_4$  überlagerte sich und zeigte einen ansteigenden Verlauf. Am Ende des Untersuchungszeitraumes lag der E-Modul bei einem Wert von ca. 39000 N/mm<sup>2</sup>. Dieser fiel damit um etwa 2000 N/mm<sup>2</sup> geringer aus als bei den Mörteln mit natürlich eingestelltem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$ .

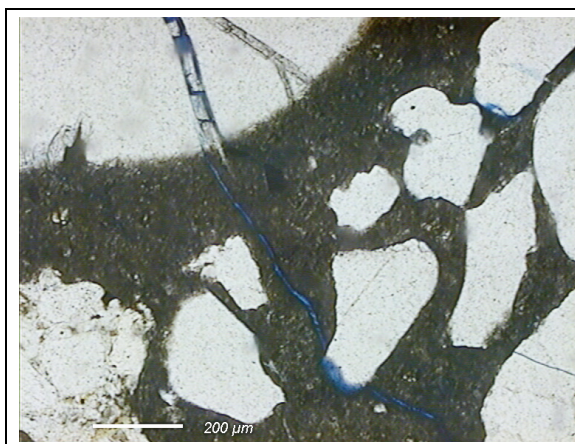
Zusammenfassend sind die maximalen Dehnungen der Probekörper mit BSGP in Abhängigkeit von deren Anteil am Gesamtzuschlag sowie dem Alkaliäquivalent und der Art der zugesetzten Alkalien in Bild 4.26 dargestellt:



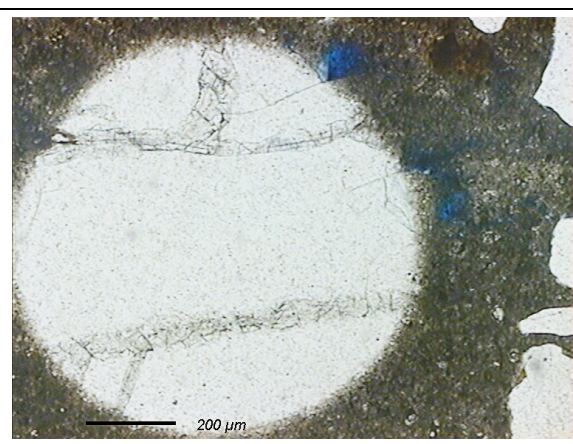


**Bild 4.26:** Einfluss des BSGP-Anteiles am Gesamtzuschlag auf die maximale Dehnung von Mörtelprismen in Abhängigkeit vom Alkaligehalt und der Art der zugesetzten Alkalien

Auch mikroskopisch waren die Schädigungen der Alkali-Kieselsäure-Reaktion nachweisbar. In Bild 4.27 ist links oben eine Borosilikatglasperle zu sehen, bei der sich bereits Risse gebildet haben, die sich auch in die Zementsteinmatrix fortsetzen. Bild 4.28 zeigt ebenfalls eine AKR-geschädigte Borosilikatglasperle, bei der sich die Randzone infolge Alkalieinwirkung aufzulösen beginnt.



**Bild 4.27:** Dünnschliff, 5fache Vergrößerung: BSGP im Mörtel D02 mit Riss, der sich in der Zementsteinmatrix fortsetzt (nach rechts unten)



**Bild 4.28:** Dünnschliff, 5fache Vergrößerung: BSGP im Mörtel D02 mit sich auflösender Randzone infolge Angriff durch Alkalien

Vergleicht man die Performance der Borosilikatglasperlen mit der des chemisch nahezu identischen Borosilikatglasgranulates, so ergeben sich folgende Unterschiede: Der Mörtel B02 (25 % BSGG) mit alkalireichem Zement wies nach ca. 4,5 Monaten eine maximale Dehnung von 0,85 mm/m auf. Die Mischung D02 (25 % BSGP), ebenfalls mit alkalireichem Zement, erreichte diesen Wert schon nach ca. 6 Wochen, die maximale Dehnung lag nach ca. 5,5 Monaten bei 1,4 mm/m. Ein ähnliches Dehnungsverhalten wie D02 zeigte B03 mit 40 % BSGG. Bei Verwendung von alkaliarmem Zement und 25 % BSGP (D03) war dagegen innerhalb des Untersuchungszeitraumes von fast 6 Monaten praktisch keine Dehnung eingetreten, während die entsprechende Mischung mit 25 % BSGG (B04) den kritischen Grenzwert innerhalb von 4 Monaten überschritt.

Gegenüber BSGG ergab sich für die Mörtel mit BSGP also ein höheres Dehnungspotential, während dieses gleichzeitig bei Verwendung von NA-Zement deutlich geringer ausfiel. Da sich beide Materialien chemisch kaum unterscheiden, muss die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit eine Ursache für das abweichende Dehnungsverhalten sein. Außerdem handelte es sich bei BSGP um Körner mit definiertem Durchmesser von 3 mm, während das BSGG ein Korngemisch mit Körnern von 2 bis 4 mm Durchmesser ist, was die Reaktivität ebenfalls beeinflusst.

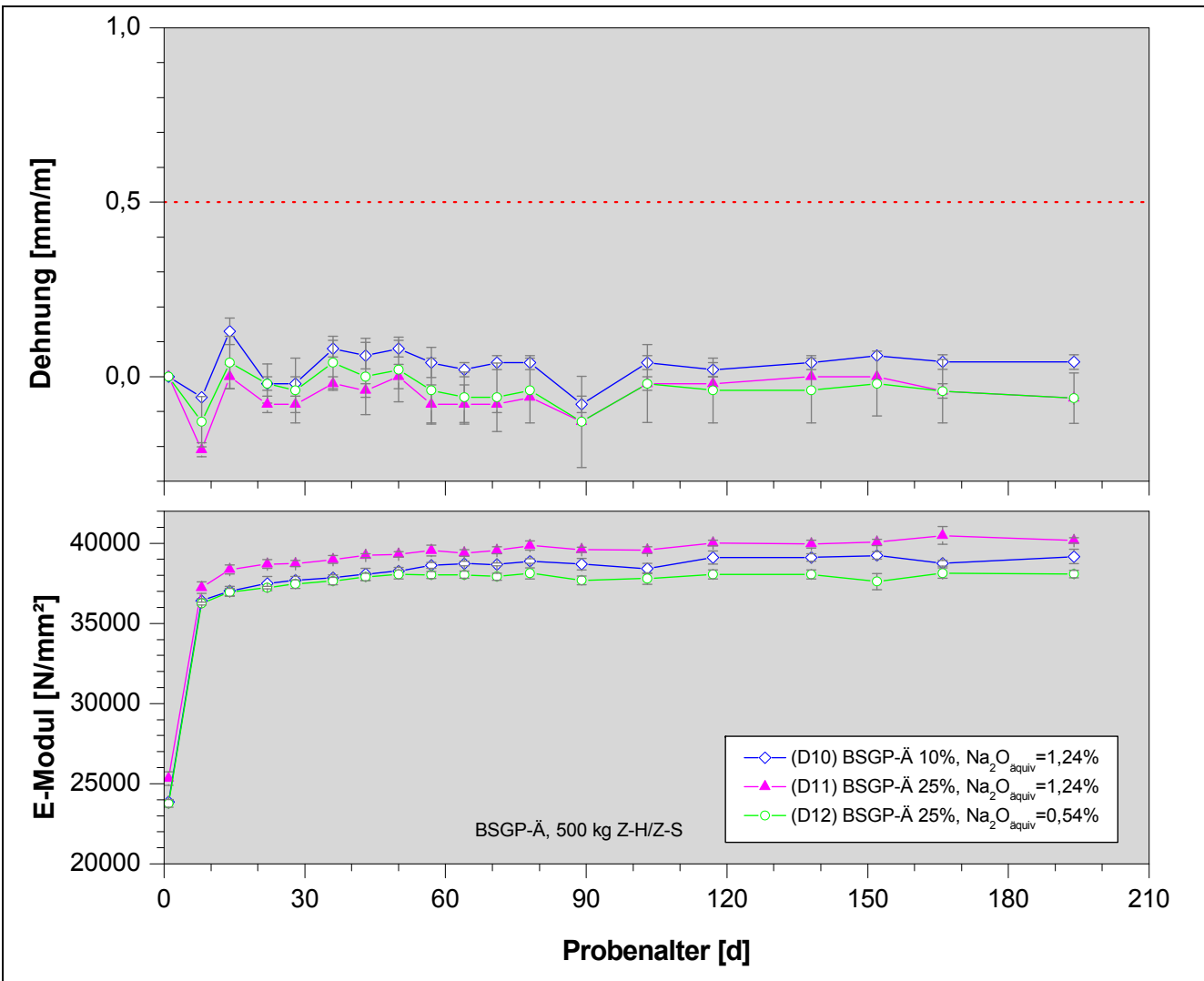
Bemerkenswert bei dieser Versuchsreihe ist außerdem die Tatsache, dass weniger der absolute Gehalt an Alkalien im Beton ausschlaggebend für eine AKR war, als vielmehr deren Herkunft. Die von LOCHER [Loc73] ermittelte Menge von mindestens 3 kg Alkalien pro  $\text{m}^3$  Beton zur Provozierung einer AKR bei opalhaltigen Körnungen war hier zwar mit  $3,95 \text{ kg/m}^3$  gegeben, brachte bei Verwendung von BSGP und einem Zement mit natürlich vorhandenem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 % keine Dehnungen über den kritischen Grenzwert hinaus bzw. Verluste des E-Moduls hervor. Dagegen provozierten die geringfügig zugesetzten Alkalien in Form von NaOH bei einem an sich alkaliarmen Zement mit einem daraus resultierenden Gesamt- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von ebenfalls 0,79 % durchaus die sichtbaren Folgen einer AKR.

Setzt man dem NA-Zement  $\text{K}_2\text{SO}_4$  statt NaOH zur Erhöhung des  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  auf 0,79 % zu, so bleibt die provozierte Dehnung ähnlich wie beim Zement mit natürlich vorhandenem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 % weit unter dem kritischen Grenzwert zurück. Na- bzw. K-Ionen beeinflussen die Ausprägung einer AKR nicht im gleichen Maße, was mit dem unterschiedlichen Quellverhalten Natrium- bzw. Kalium-haltiger Alkali-Kiesel-Gele zu begründen ist.

#### **4.5.2 GEÄTZT**

In dieser Versuchsreihe wurden die Mörtelmischungen D10 bis D12 mit einem alkali-reichen und einem alkaliarmen Zement hergestellt, bei denen 10 bzw. 25 % der inerten Gesteinskörnung durch geätzte Borosilikatglasperlen (BSGP-Ä) ersetzt worden sind.

Die Ergebnisse für die zwecks Minderung der Reaktivität geätzten Borosilikatglasperlen zeigt Bild 4.29.



**Bild 4.29:** Dehnungsverlauf und E-Modul von Mörtelmischungen mit BSGP-Ä in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung eines alkalischen und eines alkalireichen Zementes

Bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes konnte für keine der Mischungen eine signifikante Dehnung oder ein Abfall des E-Moduls beobachtet werden.

Der beabsichtigte Effekt, die Reaktivität der BSGP ggf. absenken zu können, ist damit erreicht worden. Allerdings so, dass nach der Oberflächenätzung praktisch keine Dehnung der daraus hergestellten Probekörper festgestellt werden konnte. Möglicherweise ließe sich bei kürzerem Ätzen dieser Effekt besser abstufen. Jedoch ist nach bisherigem Erkenntnisstand eine Minderung der Reaktivität der BSGP nicht nötig, da keine Überempfindlichkeiten aufgetreten sind.

Insgesamt lässt sich anhand der durchgeführten Untersuchungen feststellen, dass unbehandelte Borosilikatglasperlen des Durchmessers 3 mm bei Verwendung mit einem alkalireichen Zement eine AKR zuverlässig anzeigen. Anders als bei Borosilikatglasgranulat findet die Reaktion bei Verwendung eines NA-Zementes aber nicht in kritischem Maße statt. Die grundsätzliche Eignung des Materials als Referenzkörnung zum Nachweis einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist damit gegeben.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aufgrund des nach wie vor großen Forschungsbedarfs auf dem Gebiet der Alkali-Kieselsäure-Reaktion, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene künstliche Körnungen hinsichtlich ihrer Eignung als Referenzkörnung für eine AKR untersucht.

Borosilikatglasscherben, welche derzeit als gebräuchliches Standardmaterial für den Nachweis einer AKR gelten, sind zwar alkalireaktiv, weisen aber gleichzeitig eine Überempfindlichkeit auf. Bedingt durch den Herstellungsprozess des Glasbruchs ist es durch dabei entstehende Mikrorisse und die irreguläre Oberfläche der Scherben außerdem schwierig, eine genau definierte und reproduzierbare Körnung herzustellen.

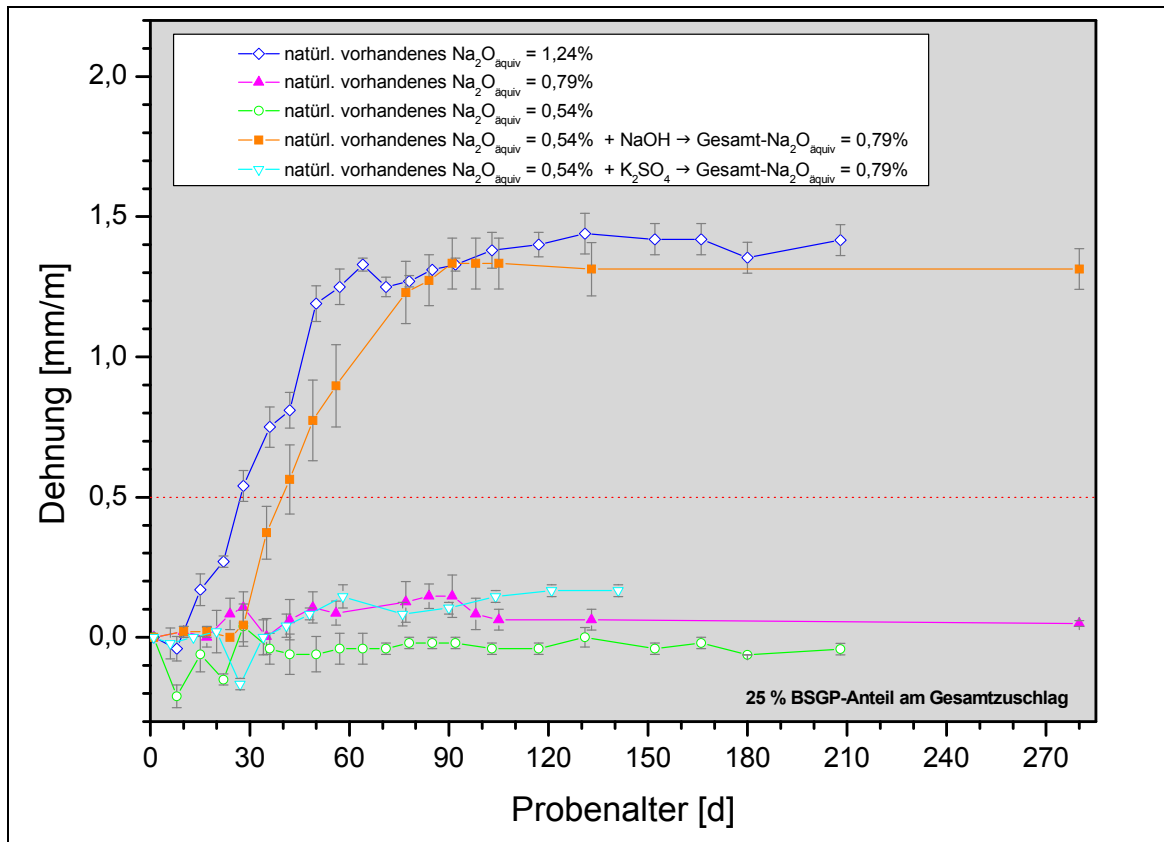
Aufbauend auf der an sich guten Eignung des Materials wurden daher aus Borosilikatglasmehl Glasperlen der Körnungen 1/2, 2/4 und 4/8 mm im Drehrohrofen gesintert und hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität untersucht. Daraus wurden Mörtelprismen hergestellt, bei denen Zemente mit unterschiedlichem Alkaliäquivalent verwendet und variierende Anteile der inerten Gesteinskörnung durch Borosilikatglasperlen ausgetauscht wurden. Zur Erhöhung des Alkaliäquivalentes wurden z. T. noch zusätzlich Alkalien dem Anmachwasser zugegeben. Die so hergestellten Prismen wurden bei 40 °C und 100 % r. F. in der Nebelkammer eingelagert und in regelmäßigen Abständen hinsichtlich ihres Dehnungspotentials und einer möglichen Gefügeschädigung (durch Resonanzfrequenzmessung) untersucht. Analog zu den Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung wurden noch solche aus industrieller Herstellung, Borosilikatglasgranulat und Quarzglasgranulat auf ihre Eignung als Referenzkörnung getestet. Die grundsätzliche Alkalireaktivität aller Materialien wurde mit Hilfe des Mörtelschnelltests nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Generell gilt für alle Probekörper, die die kritische Dehnung überschritten haben, dass ein Abfall der E-Modul-Entwicklung infolge der AKR bedingten Mikrorissbildung beobachtet werden konnte. War der hauptsächliche Zuwachs der Dehnung abgeschlossen, flachte also die Dehnungskurve ab, so stieg auch der E-Modul wieder an. Ausheilungsprozesse innerhalb des Gefüges sowie die fortschreitende Zementthydratation wirkten der Gefügeschädigung entgegen.
- Der Dehnungsgrenzwert von 0,5 mm/m hat sich als gerechtfertigt bewahrheitet, da erst bei dessen Überschreiten ein signifikanter E-Modul-Abfall zu beobachten ist. (Moderate) Gelbfärbung allein führt noch nicht zu einem E-Modul-Abfall.
- Borosilikatglasgranulat reagiert gegenüber Alkalien überempfindlich. Mörtelprismen, die mit NA-Zement (500 kg/m<sup>3</sup>) und Borosilikatglasgranulat der Körnung 2/4 mm (Anteil 40 % an Zuschlagmenge), hergestellt wurden, überschritten den kritischen Dehnungsgrenzwert bei Nebelkammerlagerung.

- Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung sind alkalireaktiv. Maximale Dehnungen wurden mit der Fraktion 2/4 mm erreicht, die 40 % der Gesamtzuschlagmenge ausmachte. Allerdings ist die Körnung nicht ausreichend sensitiv hinsichtlich einer AKR, da nur dann Dehnungen der Probekörper provoziert werden konnten, wenn mit hohen Zementgehalten ( $800 \text{ kg/m}^2$ ) gearbeitet wurde und wenn dem Anmachwasser noch zusätzliche Alkalien zugesetzt wurden. Gründe dafür sind Inhomogenitäten hinsichtlich der Porosität innerhalb der einzelnen Fraktionen. Da es sich um eine offene Porosität handelt, können die Alkalien zwar ins Innere des Kornes eindringen. Das sich bildende Alkalisilikatgel füllt aber zunächst die Poren, so dass nicht genügend Quelldruck aufgebaut werden kann, um eine Dehnung der Probekörper über den kritischen Grenzwert hinaus zu provozieren. Wurden nur die dicht gesinterten Glasperlen im Mörtel verwendet, konnten auch bei geringeren Zementgehalten ( $500 \text{ kg/m}^3$ ) kritische Dehnungen beobachtet werden. Als Referenzkörnung sind die Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung nicht geeignet.
- Druckfestigkeiten, die an Prismen, die Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung enthielten, gemessen wurden, konnten anhand eines vereinfachten Modells mit den aus den Resonanzfrequenzen berechneten E-Moduln korreliert werden. Es ließen sich Korrelationskurven sowohl für ungeschädigte Proben als auch für Mörtelprismen, die AKR-geschädigt waren, aufstellen.
- Quarzglasgranulat ist ebenfalls alkalireaktiv. Bei Verwendung eines alkalireichen Zementes stellten sich maximale Dehnungen dann ein, wenn die Fraktion 2/4 mm für die Herstellung der Probekörper verwendet wurde. Es wurden bis zu 50 % der inerten Gesteinskörnung ausgetauscht. Dabei fielen die Dehnungen umso höher aus, je größer der Gehalt an Quarzglasgranulat gewählt wurde, ein pessimaler Gehalt an Quarzglasgranulat konnte also nicht festgestellt werden. Auch bei Verwendung von NA-Zement wurde der Dehnungsgrenzwert deutlich überschritten, so dass auch dieses Material als Referenzkörnung nicht geeignet ist.
- Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung und mit einem Durchmesser von 3 mm sind alkalireaktiv und wiesen die gewünschte Sensitivität auf. Daraus hergestellte Probekörper, bei denen zudem ein alkalireicher Zement verwendet wurde ( $500 \text{ kg/m}^3$ ), zeigten maximale Dehnungen bei einem Glasperlenghalt von 40 %. Dies entspricht auch dem Pessimum des chemisch vergleichbaren Borosilikatglasgranulates. Allerdings fiel bei den industriellen Borosilikatglasperlen die maximale Dehnung höher aus. Überempfindlichkeiten bei Verwendung von NA-Zement wurden nicht beobachtet. Damit ist das Material nach bisherigem Stand der Untersuchungen als Referenzkörnung zum Nachweis einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geeignet.
- Mörtelprismen, die aus einem Zement mit einem Alkaliäquivalent von 0,79 % bei gleichzeitiger Verwendung von Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung hergestellt wurden, zeigten keine Dehnungsreaktion. Probekörper, die dagegen unter Verwendung eines alkaliarmen Zementes ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 0,54 \text{ \%}$ ) hergestellt wurden, der zusätzlich mit so viel NaOH versetzt wurde, dass sich ein Gesamt- $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}$  von 0,79 % einstellte, dehnten sich deutlich über den kritischen Grenzwert hinaus. Bei anderen Proben wiederum, die ebenfalls mit alkaliarmem Zement aber statt mit NaOH mit  $\text{K}_2\text{SO}_4$  hergestellt wurden, stellte sich keine kritische

Dehnung ein. In Bild 5.1 ist diese Problematik für Mörtel mit einem BSGP-Anteil von 25 % des Gesamtzuschlages und unter Verwendung verschiedener Zemente (500 kg/m<sup>3</sup>) mit unterschiedlichem Alkaliäquivalent zusammenfassend dargestellt:



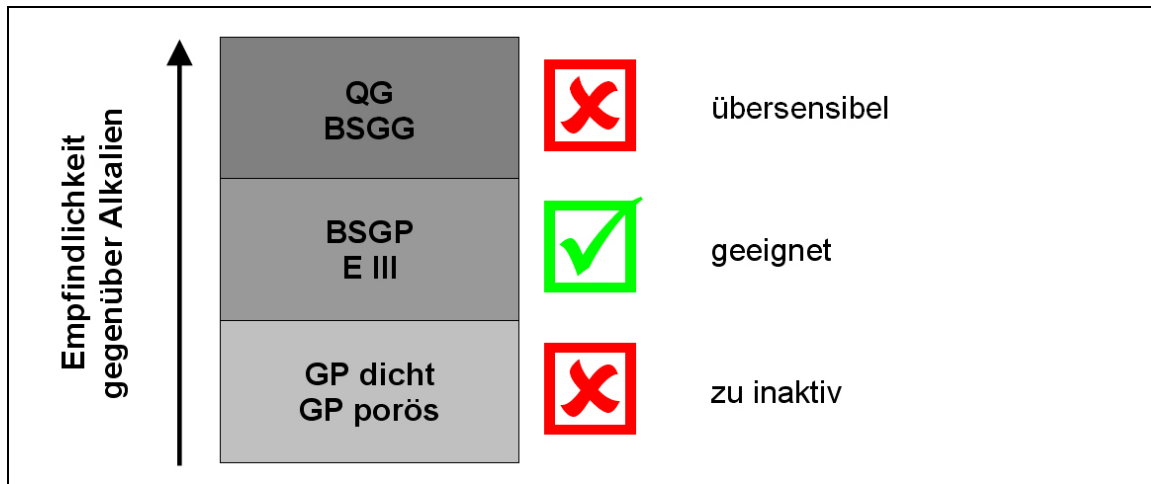
**Bild 5.1:** Dehnungsverlauf von Mörtelprismen mit 25 % BSGP in Abhängigkeit vom Alkaliäquivalent und der Art der zugesetzten Alkalien

Mörtel mit einem künstlich eingestellten Alkaliäquivalent von 0,79 % überschreiten den kritischen Dehnungsgrenzwert von 0,5 mm/m zwar später, entwickeln aber eine fast annähernd so große maximale Dehnung wie die Proben mit einem natürlich vorhandenen Alkaliäquivalent von 1,24 %. Die Zugabe von  $\text{K}_2\text{SO}_4$  erzielt dagegen kein kritisches Dehnungspotential.  $\text{NaOH}$  geht wie das im Zement natürlich vorhandene  $\text{K}_2\text{SO}_4$  sofort in Lösung und steht als Reaktionspartner unmittelbar zur Verfügung. Damit wird deutlich, dass der Herkunft der Alkalien bzw. deren Bindung im Zement (Anteil der sulfatisch gebundenen Alkalien gegenüber denen, die in den Klinkerphasen eingebaut sind) insbesondere bei moderaten Alkaligehalten eine entscheidende Rolle für die mögliche Entwicklung einer betonschädigenden AKR zukommt.

- Mit Flusssäure geätzte Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung sind praktisch nicht alkalireaktiv.  $\text{SiO}_2$  geht durch das Ätzen in Lösung und steht als Reaktionspartner für Alkalien nicht mehr zur Verfügung, während sich gleichzeitig an der Glasperlenoberfläche Boratverbindungen anreichern. Durch eine angepasste Einwirkdauer der Flusssäure ließe sich die „Deaktivierung“ der Borosilikatglasperlen ggf. steuern.
- Für die Borosilikatglasperlen aus industrieller Herstellung gilt, dass die daraus hergestellten Mörtelproben im Falle einer AKR-Schädigung den kritischen

Grenzwert nach längstens 8 Wochen erreicht bzw. überschritten haben, so dass eine Beurteilung des Schadenspotentials nach 2 Monaten zuverlässig möglich ist.

- Bild 5.2 zeigt zusammenfassend die Sensitivitätsbewertung der untersuchten Materialien und gibt deren Eignung als Referenzmaterial zum Nachweis der AKR an:



**Bild 5.2:** Sensitivitätsbewertung der untersuchten Materialien und deren Eignung als Referenzkörnung zum Nachweis einer AKR

Ausblickend auf den weiteren Forschungsbedarf sollte das Reaktionspotential der Borsilikatglasperlen aus industrieller Herstellung noch detaillierter untersucht werden. Dabei ist die Beeinflussung der Reaktivität durch verschiedene Parameter der Betonzusammensetzung (w/z, Zusatzstoffe, Porengehalt) von Interesse, wohingegen hier nur Mörtel untersucht wurden.

Besonderes Augenmerk ist auch auf das Verhalten gegenüber im Zement unterschiedlich gebundenen Alkalien zu richten. Hier sollten Zemente mit unterschiedlichen Sulfatisierungsgraden im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen. Je höher der Sulfatisierungsgrad, desto höher ist der Anteil der Alkalien, die in sulfatisch gebundener Form vorliegen. Diese gehen nach Kontakt mit dem Zugabewasser zum Zement sofort in Lösung und stehen für eine mögliche AKR als Reaktionspartner unmittelbar zur Verfügung. Selbst bei insgesamt geringen Alkaliäquivalenten ist in diesem Fall möglicherweise eine kritische Dehnung und damit eine AKR-Schädigung bei Vorhandensein einer alkaliempfindlichen Zuschlagkörnung gegeben.

Nicht zuletzt gilt es, Laborergebnisse mit Langzeituntersuchungen von unter Außenklima gelagerten Probekörpern zu vergleichen, um die Übertragbarkeit auf Praxisbedingungen abschließend zu gewährleisten.

Um das Modell zur Korrelierung des aus den Resonanzfrequenzen berechneten dynamischen E-Moduls mit den gemessenen Druckfestigkeiten weiter zu verfeinern, sind entsprechende Untersuchungen notwendig. Dabei ist vor allem eine hohe Datendichte von Wichtigkeit, um alle Einflussparameter in einer Modellgleichung berücksichtigen zu können. Eine genaue Korrelation könnte es zukünftig ermöglichen, von der zerstörungsfrei zu bestimmenden Resonanzfrequenz über den berechneten dynamischen E-Modul auf die vorhandene Druckfestigkeit einer Probe zu schließen. Damit ließen sich erhebliche Mengen Material einsparen und der Zeitaufwand zur Herstellung von Probekörpern deutlich senken.



## 6 LITERATUR

- Alk-RiLi01      DAFStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Teil 1 bis 3, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2001
- Alk-RiLi07      DAFStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Teil 1 bis 3, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln, Ausgabe 2007
- Ast1260        ASTM C 1260-07: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), American Society for Testing and Materials, 2007
- Ast1293        ASTM C 1293-08: Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, American Society for Testing and Materials, 2008
- Ast227         ASTM C 227-03: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), American Society for Testing and Materials, 2003
- Ast289         ASTM C 289-07: Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), American Society for Testing and Materials, 2007
- Bok01         BOKERN, J.; SIEBEL, E.: Alkali-Silica Reaction in Germany- Transfer of Laboratory Results to Practise, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf
- Bok02         BOKERN, J.: Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion, 41. Forschungskolloquium des DAFStb am 11. und 12. Juli 2002, S. 133-145
- Bon73         BONZEL, J.; DAHMS, J.: Alkalireaktion im Beton, Beton, Heft 11/1973 S.495-500 und Beton Heft 12/1973, S. 547-554
- Bon86         BONZEL, J.; KRELL, J.; u.a.: Alkalireaktion im Beton, Beton, Heft 9/1986, S. 345-349
- Cha86         CHATTERERJI, S.; u.a.: Studies of Alkali-silica Reaction Part 3, Cement & Concrete Research No.2, Vol. 16, 1986, S. 246-254
- Coo65         COOLEY, J.W.; TUKEY, J.W.: An algorithm for the machine computation of complex fourier series, Mathematics of computation, No. 19, 1965, S.297-301

- Dia96            DIAMOND, S.: Alkali silica reaction – some paradoxes. Proc 10<sup>th</sup> International Conference of Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne 1996, S. 3-14
- Dom03           DOMBROWSKI, K.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton, Diss., Fakultät für Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, 2003.
- Dun73           DUNCAN, M.A.G.; u.a.: Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia, Part 1: Summary of a five year study, Cement and Concrete Research, No. 3, 1973, S.55ff; Part 2: Field and petrographic studies, Cement and Concrete Research, No. 2, 1973, S.119ff; Part 3: Laboratory study and volume changes, Cement and Concrete Research, No. 3, 1973, S.233ff
- Erf96            ERFURT, W.; KROMPHOLZ, R.: Anwendungen von Dehnwellenmessungen für Baustoffuntersuchungen, Wissenschaftliche Zeitschrift Bauhaus-Universität Weimar 42, Heft 4/5, 1996, S. 95-100
- Fra04            FRANKE, L.; WITT, S.: Schnelltest auf Alkalireaktion – Übertragbarkeit eines international anerkannten Schnelltests auf deutsche Verhältnisse, Betonwerk und Fertigerteiltechnik, Nr. 5, 2005, S. 14-21
- Fre00            FREYBURG, E.; BERNINGER A.M.: Bewertung alkalireaktiver Zuschläge außerhalb des Geltungsbereiches der Alkalirichtlinie des DafStB: Kenntnisstand und neue Ergebnisse. 14. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 2000, Weimar, Tagungsband 1, S. 1-0931 – 1-0947
- Fre98            FREYBURG, E.: Betonschäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktionen: Petrographische Ursachen und mikroskopische Diagnose. Vortrag Dyckehoff-Forum, Wiesbaden, 1998
- Gil73            GILLOT, J.E.; u.a.: Alkali-Aggregate Reaction, IV – Charakter of the reaction, Cement and Concrete Research, No. 5, 1973, S. 521ff
- Grü01            GRÜBL, P.; u.a.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2001
- Gud99            GUDMUNDSSON, G.; OLAFSSON, H.: Alkali-silica reactions and silica fume - 20 years of experience in Iceland, Cement and Concrete Research, No. 1, Vol. 29, 1999, S. 1289-1297
- Hof88            HOFFMANN, D.; FUNKE, K.-P.: Die Infrarot-Spektroskopie als Methode zur Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzuschlagstoffen. Silikattechnik, Nr. 10, Jahrg. 39 1988, S. 341-344
- Hüb99            HÜBERT, C.; WIEKER, W.; u. a.: Über den Einfluss des Natrium- und Kaliumgehaltes von Zementen auf das Dehnungsverhalten von daraus hergestellten Mörteln, Bauchemie von der Forschung bis zur Praxis: Beiträge der 2. Tagung Bauchemie, Siegen 1999, S.31-35
- Ido97            IDORN, G.M.: Concrete Progress – from antiquity to third millenium, Thomas Telford Publishing, London, 1997

- Kli63 KLIEGER, P.; ISBERNER, A.: Laboratory studies of blended cements – Portland blastfurnace slag cements. Journal PCA Research and Development, No.39, 1963, S. 2-22
- Kra86 KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1986
- Loc00 LOCHER, F.W.: Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, 2000
- Loc01 LOCHER, F.W.: Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau und Technik, 2001
- Loc75 LOCHER, F. W.; SPRUNG, S.: Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton, Sonderdruck „Zement-Kalk-Gips“, Heft: 4/1975 Jahrgang 28, S. 162-169
- Mat65 MATHER, B.: Investigations of Portland blastfurnace slag cements, Report 2, Supplementary data. U.S Army eng. Waterway Esp. Station corps of Engineers, Techn. report 6/455, 1965, S. 1-61
- Nis89 NISHIZAKI, I.; KATAWAKI, K.: The characterization of ADR products and alkalies in cement paste. Proc. 8<sup>th</sup> International Conference of Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto 1989, S. 549-554
- Obe86 OBERHOLSTER, R.E.; DAVIES G.: An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates, Cement and Concrete Research 16, 1986, S. 181-189
- Ött04 ÖTTL, CH.: Die schädigende Alkalireaktion von gebrochener Oberrhein-Gesteinskörnung im Beton, Diss., MPA Stuttgart, 2004
- Pet92 PETTERSSON, K.: Effects of silica fume on alkali-silica reaction in mortar specimens, Cement and Concrete Research No.1, Vol. 22, 1992, S.15-22
- Phi04 PHILLIP, O.; EIFERT, K.: Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung, Beton+Fertigteil Technik, Heft 10, 2004, S. 6-19
- PI Physik Instrumente (PI): PZ 62E User Manual, E-500 Series PZT Control Electronics, 2004
- Pik55 PIKE, R.G.; HUBBARD, D.; NEWMAN, E.S.: Mechanism of alkali aggregate reaction. Journ. ACI 27, No.1, 1955, S.13-34
- Poh65 POHL, E.: Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für Beton, 2.Auflage, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1965, S. 6-200
- Poly1 Fa. Polytec: Vibrometer Einpunkt-Messkopf OFV-505/-503, Handbuch
- Poly2 Fa. Polytec: Vibrometer-Controller OFV-2500-1, Handbuch

- Ran06 RANGARAJU, P.R. ; u.a.: Investigation into Potential of Alkali-Acetate Based Deicers in Causing Alkali-Silica Reaction in concrete, Department of Civil Engineering, Clemson University, 2006
- Rem05 REMARQUE, W.: Untersuchungen zum Verhalten von Glasmehl mit Zement und Kalk sowie Versuche zur Dauerhaftigkeit von Zement-Glas-Mörteln, Diss., RWTH Aachen, Shaker Verlag 2005
- RIL-AAR1 RILEM recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali –reactivity of aggregates – petrographic method. Materials and Structures, Vol. 36, 2003, S. 480-496.
- RIL-AAR2 RILEM Recommended Test Method AAR-2, Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates – The ultra-accelerated Mortar-bar Test, Materials and Structures, No. 229, Vol. 33, 2000, S. 283-289
- RIL-AAR3 RILEM: Recommended test method AAR-3: detection of potential alkali-reactivity of aggregates – method for aggregate combinations using concrete prisms , Materials and Structures, No. 229, Vol. 33, 2000, S. 290-293
- RIL-AAR4 RILEM: Recommended test method AAR-4: Detection of Potential alkali-Reactivity - Accelerated method for aggregate combinations and concrete mix design's using concrete prism. Internal Report RILEM/TC-ARD/01/20, 18 p.
- SB-AiF Schlussbericht AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14242 N: Einfluss der Porenlösungszusammensetzung auf die Schädigung von Beton mit verschiedenen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion, VDZ, 2007
- Sch01 SCHÄFER, E.; MENG, B.: Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion. In: Beton-technische Berichte 2001-2003, S.145-155, Verlag Bau + Technik
- Sch04 SCHÄFER, E.: Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins, Diss., Technische Universität Clausthal, 2004
- Scho88 SCHOLZE, H.: Glas – Natur, Struktur und Eigenschaften, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1988
- Sey05 SEYFAHRT, K.; GIEBSON, C.: Beurteilung des AKR-Schädigungspotentials von Betonen mittels Klimawechselagerung, 54. Forschungskolloquium des DafStB, Okt. 2005, Wien/Österreich, Beton- und Stahlbetonbau 100, 2005, S. 189-192
- Sie00 SIEBEL, E.; SYLLA, H.-M.; BOKERN, J.: Einfluß von puzzolanischen Betonzuschlagsstoffen auf die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion, 14. Internat. Baustofftagung IBAUSIL, Sep. 2000, Weimar, Tagungsband 1 S. 1-0959 – 1-0967

- Sie01 SIEBEL, E.; BOKERN, J.; U. A.: Entwicklung neuer NA-Zemente auf Basis von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil (Teil 1), *Beton-technische Berichte*, Heft 12/2001, S. 693-697
- Sie02 SIEBEL, E.; BOKERN, J.; U. A.: Entwicklung neuer NA-Zemente auf Basis von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil (Teil 2), *Beton-technische Berichte*, Heft 1/2002, S. 47-50
- Sie06 SIEBEL, E. u.a.: AKR-Prüfverfahren – Vergleichbarkeit und Praxisrelevanz, 16. Internat. Baustofftagung IBAUSIL, Sep. 2006, Weimar, Tagungsband 2, S. 2-0373 – 2-0387
- Sie96 SIEBEL, E.; RESCHKE, T.: Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer – Untersuchungen an Laborbetonen, *Beton*, Nr. 12, Jahrg. 46, 1996, S.740-744 und Nr. 1, Jahrg. 47, 1997, S. 26-32
- Sie96a SIEBEL, E.; RESCHKE, T.; SYLLA, H.-M.: Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer – Untersuchungen an geschädigten Bauwerken, *Beton*, Heft 5, Jahrg. 46, 1996, S. 298-301 und Nr. 6, S. 366-370
- Sie97 SIEBEL, E.: Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Sonderdruck *Beton*, Nr. 9, Jahrgang 47, 1997, S. 533-537
- Spr97 SPRUNG, S.; SYLLA, H.-M.: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit und Wasseraufnahme von Betonzuschlagstoffen, Sonderdruck „Zement-Kalk-Gips International“, Nr. 2, Jahrgang 50, 1997, S. 63-74
- Spr98 SPRUNG, S.; SYLLA, H.-M.: Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen, Sonderdruck „Zement-Kalk-Gips International“, Nr. 6, Jahrg. 51, 1998, S. 334-345
- Spri07 SPRINGENSCHMID, R.: *Betontechnologie für die Praxis*, 1. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin, 2007
- Sta00 STARK, J.; WICHT, B.: *Zement und Kalk – Der Baustoff als Werkstoff*, Birkhäuser Verlag, Basel/Schweiz, 2000
- Sta01 STARK, J.; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff*, Birkhäuser Verlag, 2001
- Sta06 STARK, J.; u.a.: AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen, *Beton*, Nr. 12, Jahrg. 56, 2006, S. 574-581
- Sta06a STARK, J.; u.a.: Beurteilung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen und AKR-Performance-Prüfung Beton, 16. Internat. Baustofftagung IBAUSIL, Sep. 2006, Weimar, Tagungsband 2, S.2-0399 – 2-0426

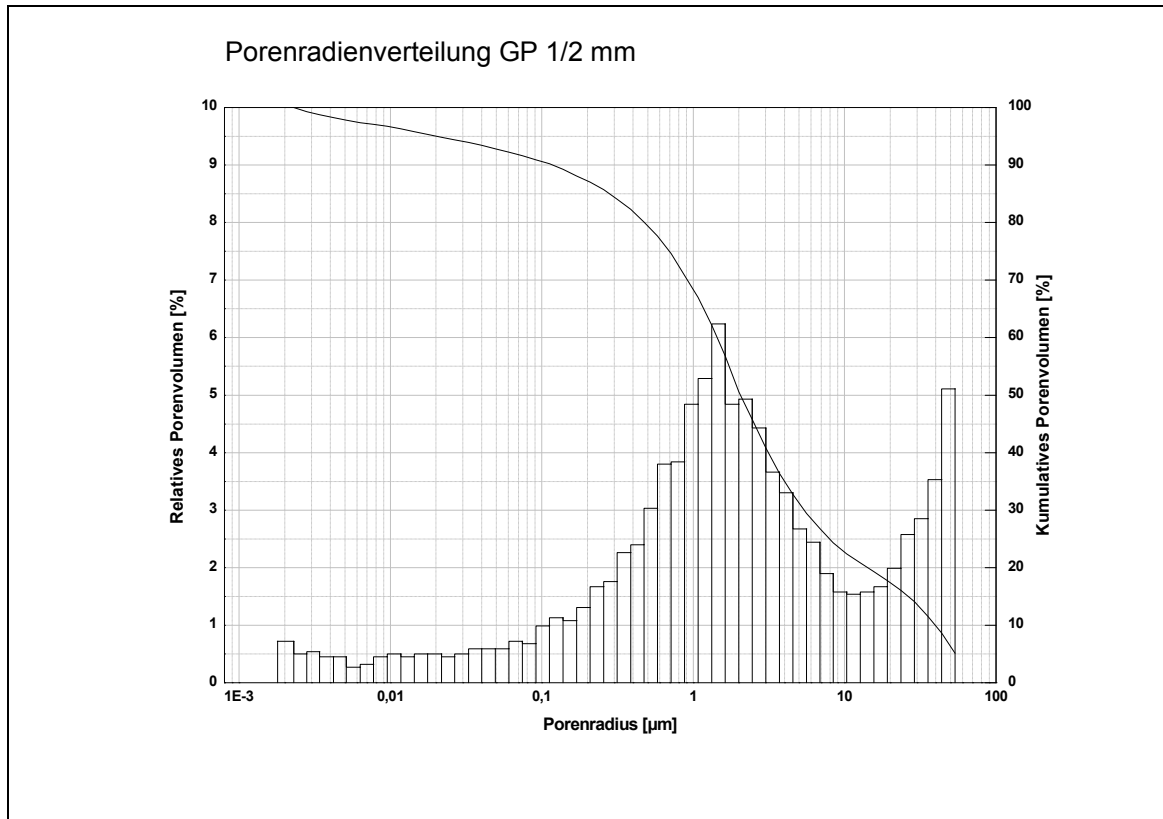
- Sta08 STARK, J.; u.a.: Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Schriftenreihe des F.A. Finger-Institutes für Baustoffkunde, Nr. 3, Bauhaus-Universität Weimar, 2008
- Sta40 STANTON, T.E.: Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 66, 1940, S. 1781-1811
- Sta79 STARK, D.: Alkali-silica-Reactivity – some Reconsiderations. Research and Development Bulletin RD076.01T. Portland Cement Association, Skokie/USA, 1997
- Tay87 TAYLOR, H.F.W.: A method for predicting alkali ion concentration in cement pore solutions, Advances in Cement Research Nr. 1, Vol. 1, 1987, S. 5-16
- Tay90 TAYLOR, H.F.W.: Cement Chemistry, Academic Press Ltd., London, 1990
- Tha90 THAULOW, N.; HOLM, J.; ANDERSEN, K.T.: Petrographic Examination and Chemical Analysis of the Lucinda Jetty Prestressed Concrete Roadway. Ramboll & Hannemann Bulletin No. 15: Alkali-Silica Reactions in concrete, 1990
- Tho95 THOMAS, M.D.: The role of fly ash and slag alkalies in alkali-silica reaction in concrete, CANMET/ACI International workshop on alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Ottawa/Canada, 1995, S. 181-204
- Wan91 WANG, H.; GILLOT, J.E.: Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. Cement and Concrete Research, No.4, Vol. 21, 1991, S.647-654
- Wie89 WIEKER, W.; HERR, R.: Zu einigen Problemen der Chemie des Portlandzementes. Zeitschrift Chemie, Nr.9, Jahrg. 29, 1989, S. 312-327

## ZITIERTE DIN

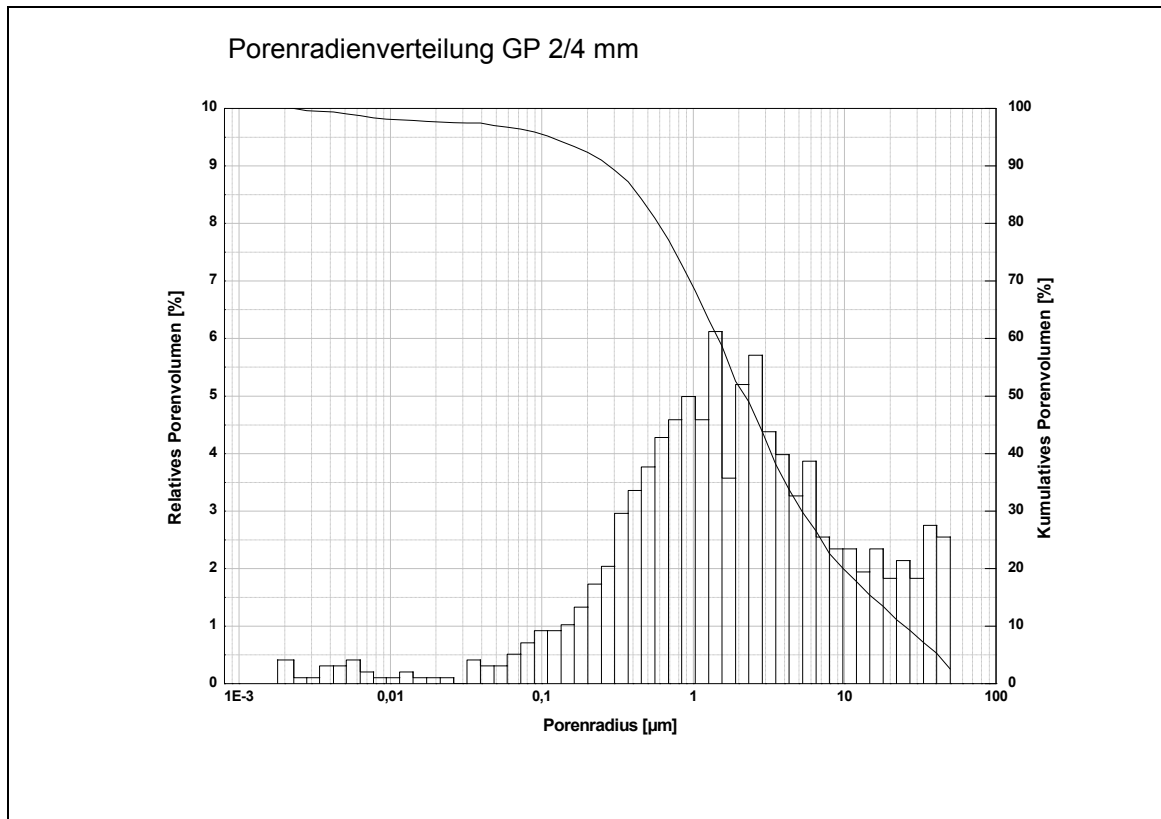
- DIN EN 196-1 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Ausgabe 2005-05; Deutsche Fassung EN 196-1:2005
- DIN EN 196-21 Prüfverfahren für Zement - Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement; Deutsche Fassung EN 196-21:1990
- DIN 1048-5 Prüfverfahren für Beton - Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper; Ausgabe 1991-06
- DIN 1164-10 Zement mit besonderen Eigenschaften - Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften; Ausgabe 2004-08

## 7 ANHANG

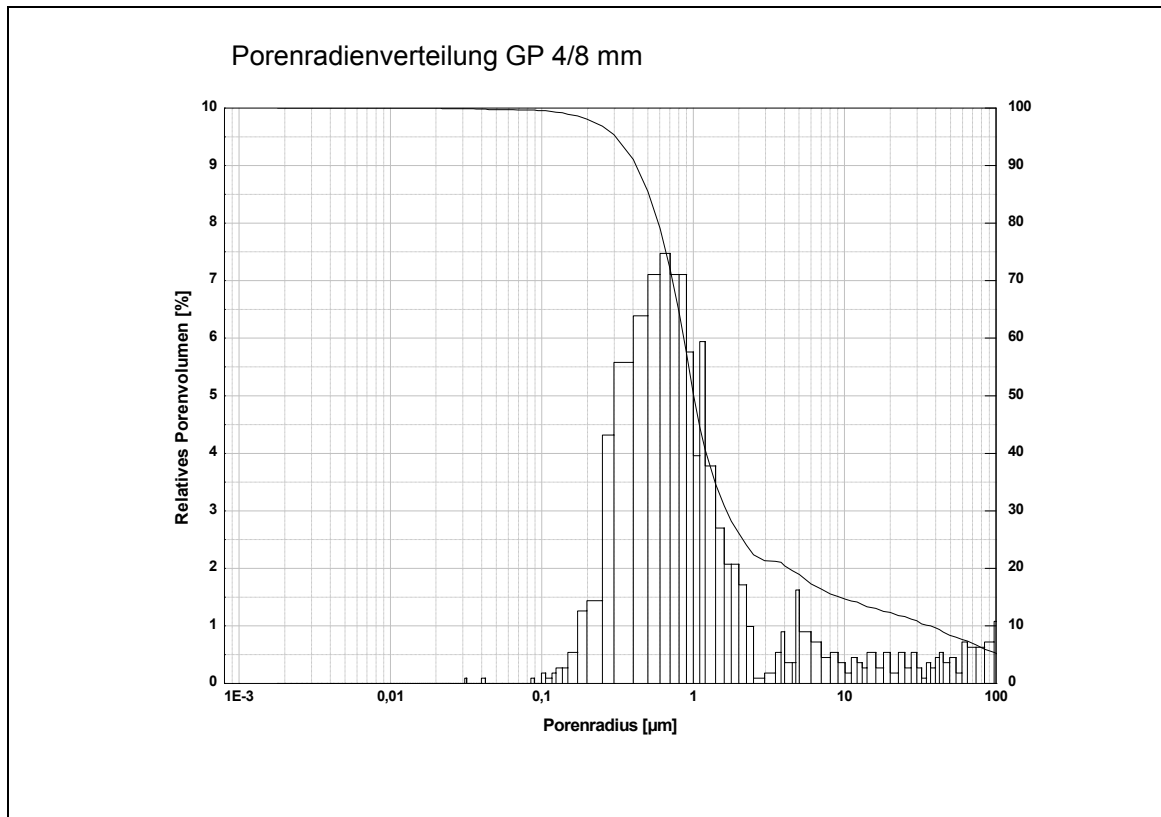
### 7.1 ERGEBNISSE QUECKSILBERDRUCKPOROSIMETRIE



**Bild 7.1:** Porenradienverteilung für Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung der Fraktion 1/2 mm

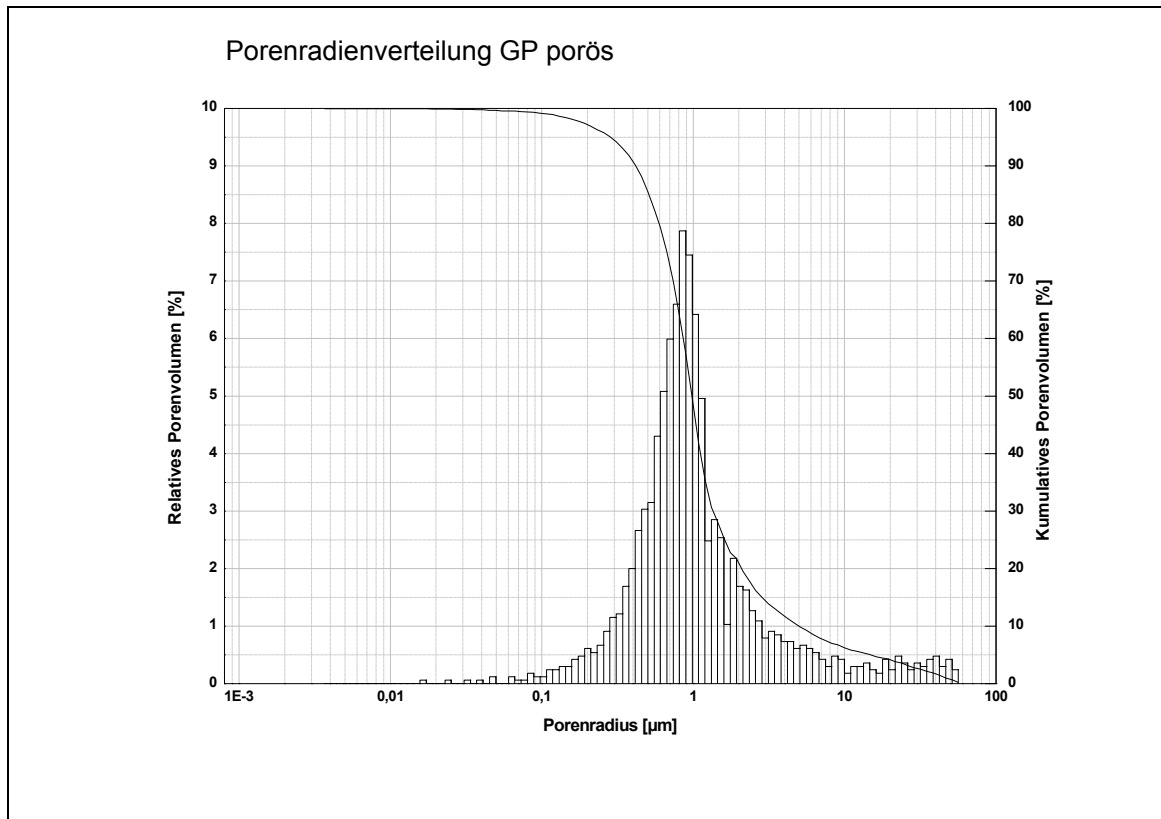


**Bild 7.2:** Porenradienverteilung für Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung der Fraktion 2/4 mm

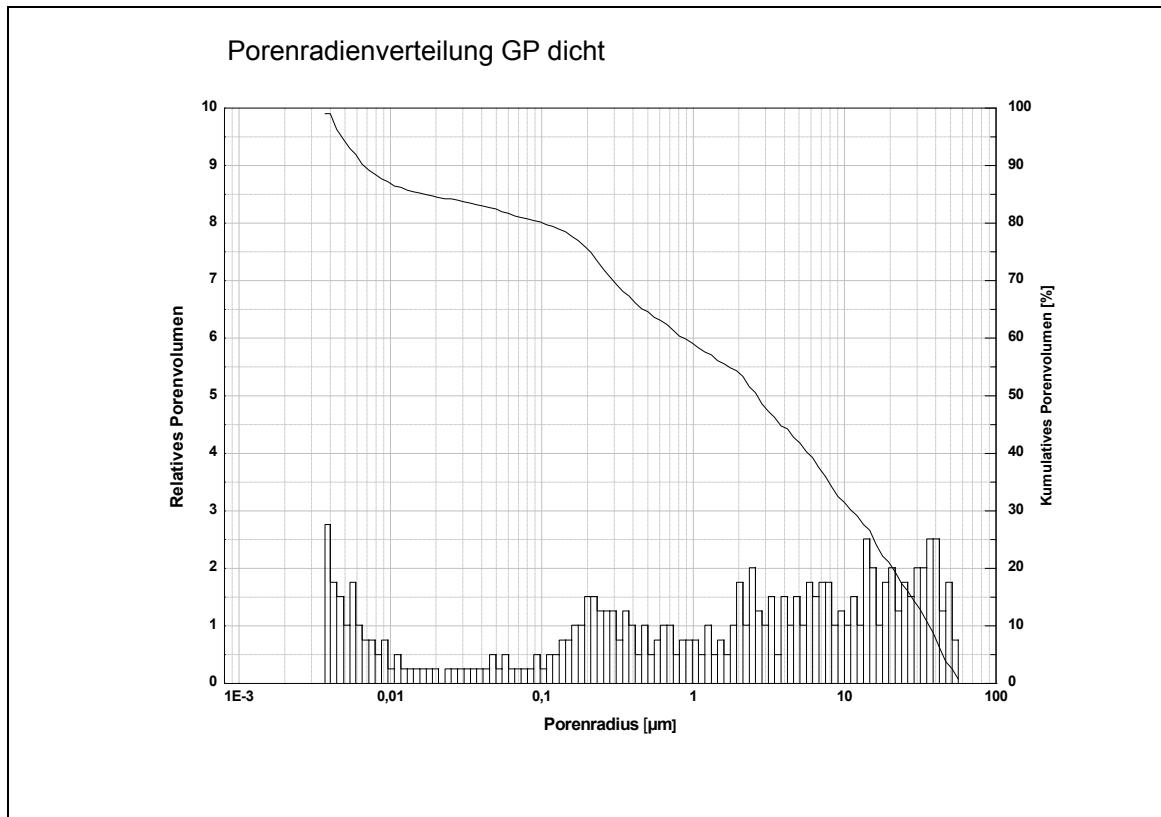


**Bild 7.3:** Porenradienverteilung für Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung der Fraktion 4/8 mm





**Bild 7.4:** Porenradienverteilung für separierte poröse Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung



**Bild 7.5:** Porenradienverteilung für separierte dichte Borosilikatglasperlen aus Eigenherstellung

## 7.2 RESONANZFREQUENZEN ZUR BERECHNUNG VON $E_{dyn}$

### 7.2.1 BOROSILIKATGLASPERLEN AUS EIGENHERSTELLUNG

**Tabelle 7.1:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie „GP 1/2mm, 800kg Z-H +  $K_2SO_4$ ,  $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$ “ zur Berechnung von  $E_{dyn}$

GP 1/2mm, 800kg Z-H + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = (1,24+0,26)%														
GP 1/2mm 15%					GP 1/2mm 30%					GP 1/2mm 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,549	0,0007	10,1	0,06	1	0,530	0,0020	10,3	0,07	1	0,548	0,0003	10,1	0,06
2	0,547	0,0003	11,6	0,00	2	0,528	0,0020	11,6	0,07	2	0,546	0,0003	11,7	0,00
3	0,546	0,0003	11,9	0,03	3	0,528	0,0025	11,7	0,03	5	0,546	0,0000	11,9	0,03
4	0,547	0,0003	11,9	0,07	6	0,527	0,0027	11,8	0,03	6	0,547	0,0000	11,8	0,00
7	0,548	0,0003	12,0	0,06	7	0,527	0,0025	11,9	0,03	7	0,548	0,0000	11,7	0,03
8	0,548	0,0003	12,0	0,07	8	0,527	0,0022	12,0	0,06	8	0,548	0,0003	11,7	0,03
9	0,549	0,0000	12,1	0,07	9	0,528	0,0023	12,0	0,03	9	0,549	0,0003	11,6	0,03
10	0,549	0,0000	12,2	0,06	10	0,528	0,0029	12,1	0,03	13	0,549	0,0003	11,6	0,00
11	0,550	0,0000	12,2	0,07	14	0,528	0,0022	12,1	0,03	16	0,550	0,0003	11,5	0,03
15	0,551	0,0003	12,3	0,03	17	0,529	0,0023	12,2	0,03	20	0,550	0,0003	11,3	0,03
18	0,551	0,0003	12,3	0,06	21	0,529	0,0020	12,2	0,00	23	0,551	0,0006	11,3	0,00
22	0,551	0,0007	12,3	0,06	24	0,529	0,0022	12,2	0,03	26	0,552	0,0007	11,3	0,00
25	0,551	0,0009	12,4	0,03	27	0,530	0,0020	12,2	0,03	30	0,552	0,0009	11,2	0,00
28	0,552	0,0006	12,4	0,03	31	0,530	0,0023	12,3	0,03	33	0,551	0,0003	11,3	0,00
32	0,552	0,0009	12,4	0,07	34	0,530	0,0022	12,3	0,03	37	0,552	0,0009	11,2	0,03
35	0,553	0,0006	12,4	0,03	38	0,531	0,0017	12,3	0,06	41	0,553	0,0007	11,3	0,00
39	0,554	0,0007	12,4	0,03	42	0,531	0,0021	12,3	0,03	51	0,554	0,0007	11,3	0,03
43	0,554	0,0006	12,4	0,06	52	0,532	0,0020	12,3	0,00	61	0,554	0,0007	11,5	0,03
53	0,554	0,0003	12,5	0,03	62	0,532	0,0020	12,3	0,03	78	0,554	0,0009	11,5	0,03
63	0,554	0,0000	12,5	0,03	79	0,533	0,0017	12,3	0,03	92	0,555	0,0007	11,6	0,03
80	0,554	0,0003	12,5	0,06	93	0,534	0,0018	12,2	0,03	117	0,555	0,0006	11,5	0,07
94	0,555	0,0003	12,5	0,03	118	0,533	0,0020	12,2	0,00	-	-	-	-	-
120	0,555	0,0000	12,5	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 7.2:** Fortsetzung: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "GP 1/2mm, 800kg Z-H +  $K_2SO_4$ ,  $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$ " zur Berechnung von  $E_{dyn}$

GP 1/2mm, 800kg Z-H + $K_2SO_4$ , $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$									
GP 1/2mm 50%					GP 1/2mm 70%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler.		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,547	0,0015	10,1	0,00	1	0,547	0,0015	10,0	0,00
2	0,545	0,0015	11,7	0,00	2	0,545	0,0015	11,6	0,00
5	0,545	0,0012	11,6	0,03	5	0,545	0,0012	11,5	0,03
6	0,545	0,0006	11,7	0,03	6	0,545	0,0009	11,5	0,00
7	0,546	0,0006	11,6	0,03	7	0,546	0,0006	11,4	0,03
8	0,546	0,0006	11,6	0,03	8	0,546	0,0009	11,5	0,03
9	0,547	0,0006	11,5	0,03	9	0,547	0,0006	11,4	0,03
13	0,548	0,0003	11,5	0,03	13	0,548	0,0006	11,4	0,03
16	0,549	0,0003	11,4	0,06	16	0,548	0,0007	11,3	0,06
20	0,549	0,0003	11,3	0,03	20	0,549	0,0006	11,2	0,03
23	0,550	0,0003	11,2	0,03	23	0,550	0,0003	11,1	0,03
26	0,550	0,0003	11,2	0,00	26	0,550	0,0003	11,1	0,00
30	0,550	0,0010	11,1	0,00	30	0,549	0,0009	11,0	0,00
33	0,552	0,0018	11,2	0,00	33	0,550	0,0003	11,1	0,03
37	0,551	0,0006	11,3	0,03	37	0,551	0,0003	11,2	0,03
41	0,551	0,0007	11,3	0,03	41	0,551	0,0007	11,2	0,03
51	0,552	0,0006	11,2	0,06	51	0,552	0,0003	11,1	0,06
61	0,552	0,0007	11,3	0,00	61	0,552	0,0007	11,2	0,00
78	0,553	0,0006	11,4	0,03	78	0,553	0,0003	11,3	0,03
92	0,553	0,0007	11,5	0,03	92	0,553	0,0007	11,4	0,03
117	0,554	0,0006	11,7	0,03	117	0,554	0,0003	11,5	0,03

**Tabelle 7.3:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "GP 2/4mm, 800kg Z-H + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> = (1,24+0,26)%" zur Berechnung von  $E_{dyn}$

GP 2/4mm, 800kg Z-H + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv.</sub> = (1,24+0,26)%														
GP 2/4mm 15%					GP 2/4mm 20%					GP 2/4mm 30%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,549	0,0006	10,4	0,03	1	0,536	0,0009	10,2	10,31	1	0,531	0,0022	10,2	0,06
2	0,547	0,0003	11,7	0,01	2	0,533	0,0009	11,8	11,75	2	0,528	0,0020	11,6	0,07
3	0,546	0,0006	11,8	0,03	3	0,533	0,0007	12,1	12,06	3	0,527	0,0020	11,7	0,04
6	0,546	0,0003	11,9	0,03	4	0,532	0,0003	12,2	12,16	6	0,526	0,0017	11,8	0,04
7	0,546	0,0003	12,1	0,01	7	0,533	0,0000	12,3	12,16	7	0,526	0,0017	11,9	0,03
8	0,547	0,0000	12,1	0,03	8	0,533	0,0003	12,3	12,26	8	0,527	0,0017	12,0	0,03
9	0,547	0,0003	12,2	0,03	9	0,533	0,0007	12,4	12,25	9	0,528	0,0019	12,0	0,03
10	0,548	0,0003	12,3	0,06	10	0,534	0,0007	12,4	12,37	10	0,528	0,0015	12,1	0,00
14	0,548	0,0000	12,3	0,03	11	0,534	0,0003	12,4	12,46	14	0,529	0,0019	12,1	0,03
17	0,548	0,0003	12,3	0,02	15	0,535	0,0006	12,5	12,46	17	0,529	0,0015	12,2	0,03
21	0,549	0,0003	12,4	0,01	18	0,535	0,0003	12,5	12,57	21	0,530	0,0019	12,2	0,01
24	0,549	0,0003	12,4	0,01	22	0,535	0,0003	12,5	12,57	24	0,529	0,0022	12,2	0,03
27	0,550	0,0003	12,3	0,01	25	0,535	0,0006	12,6	12,58	27	0,530	0,0020	12,2	0,03
31	0,551	0,0006	12,4	0,07	28	0,535	0,0009	12,6	12,60	31	0,530	0,0015	12,3	0,03
34	0,551	0,0007	12,4	0,03	32	0,536	0,0009	12,7	12,67	34	0,530	0,0017	12,3	0,03
38	0,552	0,0007	12,4	0,02	35	0,536	0,0006	12,6	12,70	38	0,531	0,0013	12,3	0,05
42	0,552	0,0003	12,4	0,01	39	0,537	0,0006	12,6	12,68	42	0,531	0,0012	12,3	0,03
52	0,553	0,0003	12,4	0,01	43	0,538	0,0007	12,6	12,68	52	0,532	0,0017	12,3	0,00
62	0,553	0,0007	12,4	0,03	53	0,539	0,0006	12,7	12,67	62	0,533	0,0018	12,3	0,04
79	0,554	0,0003	12,4	0,03	63	0,539	0,0007	12,7	12,66	79	0,533	0,0017	12,3	0,03
93	0,555	0,0003	12,4	0,01	80	0,540	0,0009	12,7	12,77	93	0,534	0,0018	12,2	0,04
118	0,555	0,0003	12,3	0,01	94	0,540	0,0007	12,7	12,76	118	0,533	0,0017	12,2	0,00
-	-	-	-	-	120	0,541	0,0006	12,7	12,77	-	-	-	-	-

**Tabelle 7.4:** Fortsetzung: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie “GP 2/4mm, 800kg Z-H +  $K_2SO_4$ ,  $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$ “ zur Berechnung von  $E_{dyn}$

GP 2/4mm, 800kg Z-H + $K_2SO_4$ , $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$									
GP 2/4mm 40%					GP 2/4mm 50%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler.		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,549	0,0007	10,1	0,06	1	0,548	0,0015	10,1	0,00
2	0,546	0,0003	11,7	0,00	2	0,545	0,0015	11,7	0,00
5	0,545	0,0009	11,8	0,04	5	0,544	0,0012	11,7	0,00
6	0,546	0,0007	11,8	0,03	6	0,544	0,0006	11,7	0,03
7	0,546	0,0010	11,8	0,03	7	0,544	0,0007	11,3	0,32
8	0,547	0,0010	11,7	0,01	8	0,545	0,0007	11,6	0,03
9	0,548	0,0010	11,6	0,02	9	0,546	0,0006	11,5	0,03
13	0,549	0,0010	11,6	0,01	13	0,547	0,0000	11,5	0,04
16	0,549	0,0009	11,5	0,03	16	0,548	0,0000	11,4	0,06
20	0,550	0,0009	11,3	0,03	20	0,548	0,0003	11,3	0,04
23	0,551	0,0006	11,3	0,00	23	0,550	0,0003	11,2	0,03
26	0,552	0,0007	11,3	0,00	26	0,550	0,0003	11,2	0,00
30	0,552	0,0007	11,2	0,00	30	0,551	0,0003	11,1	0,00
33	0,552	0,0012	11,3	0,01	33	0,551	0,0000	11,2	0,00
37	0,552	0,0009	11,2	0,04	37	0,552	0,0009	11,3	0,04
41	0,553	0,0009	11,3	0,00	41	0,552	0,0003	11,3	0,03
51	0,554	0,0007	11,3	0,03	51	0,552	0,0003	11,2	0,05
61	0,553	0,0009	11,5	0,04	61	0,552	0,0003	11,3	0,00
78	0,554	0,0009	11,5	0,03	78	0,553	0,0007	11,4	0,03
92	0,555	0,0007	11,6	0,03	92	0,554	0,0003	11,5	0,04
117	0,555	0,0010	11,5	0,07	117	0,554	0,0003	11,6	0,06

**Tabelle 7.5:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "GP 4/8mm, 800kg Z-H + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> = (1,24+0,26)%" zur Berechnung von  $E_{dyn}$

GP 4/8mm, 800kg Z-H + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = (1,24+0,26)%														
GP 4/8mm 20%					GP 4/8mm 30%					GP 4/8mm 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,560	0,0006	10,1	0,03	1	0,543	0,0012	10,0	0,02	1	0,540	0,0019	10,4	0,03
2	0,560	0,0007	11,5	0,03	2	0,541	0,0009	11,6	0,02	4	0,538	0,0019	12,0	0,01
5	0,559	0,0007	11,9	0,00	5	0,540	0,0009	12,0	0,05	5	0,537	0,0019	12,0	0,02
6	0,559	0,0010	11,9	0,03	6	0,541	0,0012	12,0	0,04	6	0,537	0,0017	12,0	0,02
7	0,560	0,0007	11,9	0,03	7	0,542	0,0012	12,0	0,02	8	0,537	0,0018	12,0	0,02
9	0,560	0,0010	12,0	0,03	9	0,543	0,0009	12,1	0,02	11	0,539	0,0019	12,1	0,02
12	0,561	0,0007	12,1	0,00	12	0,543	0,0007	12,1	0,02	15	0,539	0,0020	12,1	0,02
16	0,561	0,0009	12,1	0,03	16	0,543	0,0009	12,2	0,02	18	0,539	0,0018	12,1	0,01
19	0,562	0,0007	12,2	0,03	19	0,544	0,0006	12,2	0,01	22	0,540	0,0019	12,1	0,02
23	0,563	0,0007	12,2	0,01	23	0,545	0,0009	12,2	0,01	26	0,541	0,0019	12,1	0,01
27	0,562	0,0009	12,2	0,03	27	0,545	0,0006	12,3	0,03	36	0,541	0,0018	12,2	0,01
37	0,563	0,0009	12,3	0,04	37	0,546	0,0006	12,3	0,01	46	0,541	0,0022	12,3	0,04
47	0,564	0,0007	12,3	0,01	47	0,547	0,0003	12,3	0,01	61	0,542	0,0022	12,4	0,02
62	0,564	0,0003	12,3	0,00	62	0,547	0,0003	12,3	0,01	77	0,543	0,0021	12,4	0,02
78	0,565	0,0007	12,3	0,00	78	0,548	0,0003	12,3	0,01	102	0,544	0,0020	12,5	0,02
103	0,565	0,0003	12,3	0,00	103	0,548	0,0003	12,3	0,00	-	-	-	-	-

**Tabelle 7.6:** Fortsetzung: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie “GP 4/8mm, 800kg Z-H +  $K_2SO_4$ ,  $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$ “ zur Berechnung von  $E_{dyn}$

GP 4/8mm, 800kg Z-H + $K_2SO_4$ , $Na_2O_{äquiv} = (1,24+0,26)\%$									
GP 4/8mm 50%					GP 4/8mm 70%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,558	0,0009	10,3	0,01	1	0,554	0,0012	10,2	0,01
4	0,556	0,0009	11,7	0,06	4	0,553	0,0015	11,6	0,06
5	0,557	0,0009	11,7	0,03	5	0,555	0,0013	11,6	0,03
6	0,560	0,0009	11,7	0,04	6	0,556	0,0013	11,6	0,03
8	0,560	0,0012	11,7	0,04	8	0,557	0,0015	11,6	0,03
11	0,560	0,0006	11,7	0,03	11	0,558	0,0017	11,6	0,03
15	0,560	0,0003	11,8	0,02	15	0,558	0,0012	11,7	0,01
18	0,561	0,0003	11,8	0,04	18	0,560	0,0010	11,7	0,03
22	0,562	0,0006	11,8	0,04	22	0,560	0,0015	11,7	0,04
26	0,562	0,0003	11,8	0,03	26	0,561	0,0015	11,8	0,03
36	0,563	0,0006	11,9	0,03	36	0,562	0,0015	11,8	0,04
46	0,564	0,0003	12,0	0,03	46	0,563	0,0019	11,8	0,04
61	0,564	0,0007	12,1	0,04	61	0,563	0,0017	11,9	0,03
77	0,564	0,0013	12,1	0,01	77	0,563	0,0017	11,9	0,03
102	0,565	0,0007	12,2	0,04	102	0,564	0,0019	12,0	0,03

**Tabelle 7.7:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie “GP 2/4mm, 800kg Z-H,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 1,24\%$ “ zur Berechnung von  $E_{\text{dyn}}$

GP 2/4mm, 800kg Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 1,24%														
GP 2/4mm 20%					GP 2/4mm 30%					GP 2/4mm 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,551	0,0018	10,4	0,03	1	0,537	0,0007	10,4	0,00	1	0,526	0,0012	10,2	0,03
3	0,549	0,0041	11,8	0,00	3	0,540	0,0003	11,7	0,00	4	0,528	0,0012	11,7	0,03
6	0,555	0,0018	12,0	0,00	6	0,542	0,0006	11,9	0,00	5	0,530	0,0012	11,7	0,03
7	0,554	0,0018	12,0	0,03	7	0,541	0,0007	11,9	0,00	6	0,529	0,0015	11,8	0,03
8	0,554	0,0018	12,0	0,03	8	0,541	0,0006	11,9	0,03	11	0,528	0,0013	11,9	0,03
13	0,554	0,0015	12,2	0,00	13	0,540	0,0007	12,0	0,03	14	0,528	0,0012	12,0	0,03
16	0,555	0,0015	12,2	0,00	16	0,541	0,0009	12,1	0,00	20	0,528	0,0009	12,0	0,03
22	0,555	0,0017	12,3	0,00	22	0,541	0,0010	12,2	0,03	22	0,529	0,0012	12,1	0,03
24	0,555	0,0018	12,3	0,00	24	0,541	0,0007	12,2	0,00	26	0,529	0,0009	12,1	0,00
28	0,555	0,0018	12,3	0,03	28	0,542	0,0009	12,2	0,03	29	0,530	0,0012	12,1	0,00
31	0,555	0,0018	12,4	0,00	31	0,542	0,0010	12,3	0,03	35	0,530	0,0010	12,2	0,03
37	0,556	0,0017	12,4	0,00	37	0,542	0,0007	12,3	0,03	46	0,530	0,0013	12,1	0,09
48	0,556	0,0018	12,4	0,00	48	0,543	0,0003	12,3	0,03	61	0,530	0,0012	12,1	0,03
63	0,555	0,0018	12,5	0,03	63	0,542	0,0003	12,3	0,03	76	0,531	0,0010	12,1	0,03
78	0,556	0,0018	12,3	0,15	78	0,543	0,0006	12,3	0,03	95	0,533	0,0007	12,1	0,03
97	0,557	0,0018	12,5	0,00	97	0,544	0,0007	12,3	0,03	112	0,535	0,0010	12,1	0,03
114	0,558	0,0019	12,5	0,03	114	0,546	0,0009	12,3	0,03	127	0,537	0,0007	12,1	0,03
129	0,558	0,0018	12,5	0,03	129	0,547	0,0009	12,3	0,03	152	0,536	0,0006	12,1	0,03
154	0,559	0,0019	12,5	0,03	154	0,546	0,0012	12,2	0,03	-	-	-	-	-



Tabelle 7.8: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "GP porös, 500kg Z-H /Z-S" zur Berechnung von  $E_{dyn}$ 

GP porös, 500 kg Z-H / Z-S									
GP porös 25%, Z-H, $Na_2O_{äquiv} = 1,24\%$					GP porös 25%, Z-S, $Na_2O_{äquiv} = 0,54\%$				
Alte [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,556	0,0020	9,5	0,03	1	0,569	0,0007	10,3	0,30
8	0,561	0,0019	12,0	0,03	8	0,574	0,0007	12,4	0,03
15	0,563	0,0018	12,3	0,03	15	0,575	0,0007	12,6	0,03
22	0,563	0,0018	12,5	0,03	22	0,575	0,0007	12,6	0,00
29	0,563	0,0018	12,6	0,03	29	0,575	0,0007	12,6	0,03
35	0,564	0,0018	12,5	0,00	35	0,575	0,0013	12,7	0,03
43	0,563	0,0018	12,6	0,03	43	0,575	0,0007	12,7	0,03
49	0,559	0,0019	12,6	0,03	49	0,572	0,0007	12,7	0,00
57	0,563	0,0018	12,7	0,03	57	0,573	0,0019	12,7	0,00
64	0,563	0,0018	12,7	0,00	64	0,572	0,0022	12,7	0,03
71	0,563	0,0018	12,8	0,07	71	0,574	0,0020	12,7	0,03
78	0,564	0,0018	12,7	0,00	78	0,574	0,0009	12,7	0,03
85	0,563	0,0018	12,7	0,06	85	0,574	0,0010	12,7	0,03
92	0,561	0,0015	12,7	0,00	92	0,574	0,0010	12,7	0,03
99	0,562	0,0015	12,7	0,03	99	0,575	0,0010	12,7	0,03
110	0,559	0,0017	12,7	0,00	110	0,572	0,0010	12,7	0,03
124	0,563	0,0018	12,7	0,00	124	0,577	0,0007	12,7	0,03
138	0,564	0,0018	12,7	0,03	138	0,575	0,0007	12,7	0,03
159	0,564	0,0018	12,8	0,00	159	0,576	0,0009	12,7	0,06
173	0,564	0,0020	12,8	0,09	173	0,576	0,0006	12,8	0,03

**Tabelle 7.9:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "GP dicht, 500kg Z-H /Z-S" zur Berechnung von  $E_{dyn}$

<b>GP dicht, 500kg Z-H / Z-S</b>									
<b>GP dicht 25%, Z-H, Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> =1,24%</b>					<b>GP dicht 25%, Z-S, Na<sub>2</sub>O<sub>äquiv</sub> =0,54%</b>				
<b>Alter [d]</b>	<b>Masse [kg]</b>		<b>Resonanzfrequenz [kHz]</b>		<b>Alter [d]</b>	<b>Masse [kg]</b>		<b>Resonanzfrequenz [kHz]</b>	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,569	0,0009	9,3	0,03	1	0,567	0,0003	9,6	0,03
8	0,572	0,0012	12,1	0,06	8	0,570	0,0003	12,5	0,06
15	0,573	0,0012	12,0	0,03	15	0,570	0,0003	12,6	0,00
22	0,573	0,0012	11,9	0,03	22	0,570	0,0003	12,7	0,03
29	0,573	0,0012	11,9	0,03	29	0,570	0,0006	12,7	0,06
35	0,574	0,0012	11,8	0,03	35	0,570	0,0007	12,7	0,00
43	0,574	0,0012	12,0	0,07	43	0,571	0,0003	12,7	0,07
49	0,572	0,0012	12,0	0,09	49	0,566	0,0007	12,8	0,03
57	0,574	0,0015	12,0	0,03	57	0,570	0,0000	12,8	0,03
64	0,574	0,0012	12,1	0,03	64	0,570	0,0000	12,8	0,03
71	0,573	0,0015	12,2	0,03	71	0,570	0,0000	12,8	0,03
78	0,574	0,0012	12,2	0,00	78	0,570	0,0003	12,8	0,03
85	0,573	0,0015	12,3	0,03	85	0,568	0,0007	12,8	0,00
92	0,573	0,0012	12,3	0,00	92	0,568	0,0003	12,8	0,03
99	0,572	0,0009	12,4	0,03	99	0,570	0,0003	12,8	0,06
110	0,569	0,0012	12,4	0,00	110	0,567	0,0003	12,8	0,03
124	0,570	0,0012	12,4	0,03	124	0,570	0,0003	12,8	0,03
138	0,573	0,0012	12,4	0,03	138	0,568	0,0007	12,7	0,06
159	0,574	0,0012	12,5	0,03	159	0,568	0,0007	12,8	0,03
173	0,574	0,0012	12,5	0,03	173	0,567	0,0009	12,8	0,06

## 7.2.2 BOROSILIKATGLASGRANULAT

Tabelle 7.10: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "BSGG, 500kg Z-H,  $Na_2O_{äquiv} = 1,24\%$ " zur Berechnung von  $E_{dyn}$ 

BSGG 2/4mm, 500kg Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv.</sub> = 1,24%														
BSGG 2/4mm 10%					BSGG 2/4mm 25%					BSGG 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,594	0,0003	10,5	0,06	1	0,585	0,0003	10,4	0,06	1	0,591	0,0029	10,5	0,09
10	0,598	0,0003	12,6	0,04	10	0,588	0,0003	12,5	0,03	10	0,594	0,0029	12,5	0,07
16	0,597	0,0003	12,6	0,01	16	0,587	0,0003	12,5	0,06	16	0,592	0,0029	12,6	0,07
24	0,599	0,0003	12,7	0,03	24	0,590	0,0006	12,4	0,03	24	0,595	0,0026	12,1	0,10
31	0,598	0,0007	12,7	0,00	31	0,588	0,0012	12,3	0,03	31	0,596	0,0029	11,9	0,10
38	0,599	0,0000	12,7	0,01	38	0,590	0,0006	12,2	0,06	38	0,596	0,0029	11,8	0,12
45	0,599	0,0003	12,7	0,01	45	0,590	0,0003	12,1	0,09	45	0,596	0,0032	11,8	0,09
52	0,598	0,0003	12,7	0,03	52	0,590	0,0006	12,2	0,10	52	0,595	0,0035	11,7	0,15
59	0,598	0,0003	12,8	0,03	59	0,590	0,0003	12,2	0,13	59	0,596	0,0035	11,8	0,12
66	0,599	0,0003	12,8	0,03	66	0,590	0,0003	12,1	0,06	66	0,596	0,0035	11,9	0,15
77	0,598	0,0003	12,8	0,01	77	0,585	0,0003	10,4	0,06	77	0,596	0,0035	12,0	0,15
91	0,599	0,0003	12,9	0,03	91	0,588	0,0003	12,5	0,03	91	0,597	0,0038	12,2	0,09
105	0,599	0,0003	12,9	0,03	105	0,587	0,0003	12,5	0,06	105	0,597	0,0038	12,2	0,12
126	0,600	0,0003	12,9	0,04	126	0,590	0,0006	12,4	0,03	126	0,597	0,0032	12,3	0,07
140	0,600	0,0003	12,9	0,01	140	0,588	0,0012	12,3	0,03	140	0,597	0,0035	12,3	0,12

**Tabelle 7.11:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "BSGG,500kg Z-S,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 0,54\%$ " zur Berechnung von  $E_{\text{dyn}}$

<b>BSGG 2/4mm, 500kg Z-S, <math>\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}} = 0,54\%</math></b>									
<b>BSGG 2/4mm 25%</b>					<b>BSGG 2/4mm 40%</b>				
<b>Alter [d]</b>	<b>Masse [kg]</b>		<b>Resonanzfrequenz [kHz]</b>		<b>Alter [d]</b>	<b>Masse [kg]</b>		<b>Resonanzfrequenz [kHz]</b>	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,583	0,0006	10,1	0,06	1	0,584	0,0030	10,1	0,03
10	0,586	0,0006	12,5	0,00	10	0,587	0,0030	12,4	0,01
16	0,583	0,0006	12,5	0,00	16	0,585	0,0030	12,5	0,04
24	0,587	0,0007	12,6	0,03	24	0,587	0,0030	12,5	0,03
31	0,586	0,0009	12,7	0,00	31	0,587	0,0027	12,3	0,02
38	0,587	0,0007	12,7	0,00	38	0,587	0,0027	12,2	0,01
45	0,587	0,0007	12,7	0,00	45	0,587	0,0027	12,0	0,01
52	0,585	0,0009	12,7	0,00	52	0,583	0,0017	11,9	0,01
59	0,586	0,0007	12,7	0,03	59	0,584	0,0017	11,9	0,00
66	0,586	0,0009	12,8	0,03	66	0,584	0,0017	12,0	0,02
77	0,585	0,0007	12,7	0,03	77	0,582	0,0017	12,1	0,01
91	0,587	0,0006	12,7	0,03	91	0,585	0,0020	12,3	0,03
105	0,587	0,0006	12,8	0,00	105	0,585	0,0020	12,4	0,02
126	0,587	0,0009	12,8	0,03	126	0,585	0,0017	12,4	0,03
140	0,588	0,0006	12,8	0,00	140	0,585	0,0017	12,6	0,02

## 7.2.3 QUARZGLASGRANULAT

Tabelle 7.12: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "QG 2/4 mm, 500kg Z-H,  $Na_2O_{äquiv} = 1,24\%$ " zur Berechnung von  $E_{dyn}$ 

QG 2/4mm, 500kg Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv.</sub> = 1,24%														
QG 2/4mm 10%					QG 2/4mm 20%					QG 2/4mm 30%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,568	0,0003	8,3	0,12	1	0,565	0,0018	8,3	0,13	1	0,569	0,0007	8,2	0,03
9	0,570	0,0003	12,5	0,06	9	0,565	0,0019	12,6	0,12	7	0,568	0,0010	12,5	0,03
15	0,570	0,0003	12,5	0,06	15	0,566	0,0019	12,4	0,07	14	0,569	0,0008	12,6	0,03
22	0,571	0,0002	12,6	0,03	22	0,568	0,0019	12,1	0,13	22	0,570	0,0009	12,2	0,06
29	0,570	0,0003	12,6	0,03	29	0,568	0,0018	11,9	0,00	28	0,574	0,0007	11,6	0,12
36	0,570	0,0003	12,6	0,06	36	0,566	0,0018	12,2	0,07	48	0,575	0,0007	10,9	0,06
44	0,570	0,0003	12,5	0,15	44	0,566	0,0016	11,8	0,09	110	0,575	0,0007	11,3	0,24
50	0,572	0,0004	12,2	0,06	50	0,568	0,0017	11,5	0,03	258	0,576	0,0007	12,2	0,09
70	0,572	0,0004	12,0	0,00	70	0,569	0,0017	11,3	0,13	-	-	-	-	-
132	0,573	0,0005	12,3	0,06	132	0,569	0,0018	11,8	0,10	-	-	-	-	-
280	0,573	0,0004	12,5	0,03	280	0,571	0,0020	12,3	0,12	-	-	-	-	-

**Tabelle 7.13:** Fortsetzung: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "QG 2/4 mm, 500kg Z-H,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 1,24\%$ " zur Berechnung von  $E_{\text{dyn}}$

<b>QG 2/4mm, 500kg Z-H, <math>\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}} = 1,24\%</math></b>									
<b>QG 2/4mm 40%</b>					<b>QG 2/4mm 50%</b>				
<b>Alter [d]</b>	<b>Masse [kg]</b>		<b>Resonanzfrequenz [kHz]</b>		<b>Alter [d]</b>	<b>Masse [kg]</b>		<b>Resonanzfrequenz [kHz]</b>	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,571	0,0010	8,3	0,03	1	0,557	0,0018	8,4	0,10
7	0,571	0,0011	12,6	0,03	7	0,558	0,0020	12,5	0,03
14	0,572	0,0013	12,7	0,03	14	0,558	0,0020	12,5	0,03
22	0,572	0,0011	12,3	0,06	22	0,561	0,0017	11,9	0,10
28	0,574	0,0011	11,9	0,09	28	0,562	0,0017	11,4	0,09
48	0,576	0,0011	11,2	0,06	48	0,564	0,0016	10,9	0,03
110	0,577	0,0011	11,8	0,07	110	0,563	0,0017	11,6	0,03
258	0,578	0,0012	12,3	0,06	258	0,564	0,0016	12,3	0,00

**Tabelle 7.14:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "QG 2/4 mm, 500kg Z-S,  $Na_2O_{äquiv} = 0,54\%$ " zur Berechnung von  $E_{dyn}$

QG 2/4mm, 500kg Z-S, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv.</sub> = 0,54%														
QG 2/4mm 20%					QG 2/4mm 30%					QG 2/4mm 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,569	0,0015	9,9	0,06	1	0,573	0,0009	10,3	0,03	1	0,563	0,0014	10,4	0,06
7	0,568	0,0015	12,2	0,06	8	0,561	0,0011	12,2	0,00	8	0,555	0,0021	12,2	0,03
17	0,570	0,0014	12,1	0,03	15	0,571	0,0014	12,1	0,00	15	0,563	0,0012	12,0	0,00
23	0,569	0,0013	12,1	0,03	23	0,576	0,0009	11,7	0,00	23	0,566	0,0015	11,7	0,00
30	0,570	0,0014	11,9	0,03	42	0,576	0,0010	11,9	0,03	42	0,565	0,0015	11,7	0,00
37	0,571	0,0015	12,0	0,09	107	0,573	0,0009	12,1	0,03	107	0,563	0,0015	12,0	0,00
43	0,566	0,0015	11,8	0,03	239	0,578	0,0007	12,3	0,03	239	0,566	0,0016	12,2	0,06
50	0,569	0,0016	11,7	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	0,570	0,0015	11,7	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	0,571	0,0015	12,0	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
142	0,569	0,0013	12,1	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
274	0,569	0,0014	12,4	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 7.15:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "QG 4/8 mm, 500kg Z-H / Z-S" zur Berechnung von  $E_{dyn}$

QG 4/8mm, 500kg Z-H / Z-S														
QG 4/8mm 10%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> 1,24%					QG 4/8mm 20%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> 1,24%					QG 4/8mm 20%, Z-S, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> 0,54%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,566	0,0010	8,1	0,03	1	0,569	0,0012	7,9	0,10	1	0,572	0,0025	9,7	0,03
9	0,567	0,0010	12,4	0,09	9	0,570	0,0012	12,4	0,00	7	0,570	0,0023	12,3	0,09
15	0,567	0,0010	12,5	0,00	15	0,571	0,0012	12,5	0,07	17	0,574	0,0024	12,1	0,00
21	0,568	0,0010	12,5	0,03	21	0,572	0,0012	12,2	0,06	23	0,571	0,0023	10,9	1,30
30	0,568	0,0010	12,5	0,07	30	0,572	0,0012	12,0	0,06	30	0,572	0,0023	11,8	0,20
37	0,565	0,0010	12,6	0,03	37	0,569	0,0010	12,3	0,03	37	0,573	0,0023	11,9	0,23
45	0,567	0,0010	12,4	0,00	45	0,572	0,0009	11,9	0,03	43	0,567	0,0020	12,0	0,25
52	0,569	0,0010	12,2	0,00	52	0,573	0,0012	11,6	0,00	50	0,571	0,0021	11,6	0,19
71	0,570	0,0012	12,1	0,03	71	0,574	0,0010	11,7	0,03	58	0,572	0,0021	11,6	0,15
134	0,571	0,0009	12,1	0,17	134	0,574	0,0010	11,8	0,12	77	0,574	0,0020	11,8	0,15
280	0,571	0,0010	12,6	0,03	280	0,575	0,0009	12,4	0,07	142	0,571	0,0023	11,9	0,10
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	274	0,571	0,0023	12,1	0,12



## 7.2.4 BOROSILIKATGLASPERLEN AUS INDUSTRIELLER HERSTELLUNG

Tabelle 7.16: Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "BSGP, 500kg Z-H / Z-S" zur Berechnung von  $E_{dyn}$ 

BSGP, 500 kg Z-H / Z-S														
BSGP 10%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 1,24%					BSGP 25%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 1,24%					BSGP 25%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 0,54%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,573	0,0005	9,9	0,07	1	0,574	0,0008	9,9	0,14	1	0,574	0,0012	9,9	0,02
8	0,575	0,0008	12,5	0,07	8	0,574	0,0008	12,4	0,01	8	0,568	0,0023	12,2	0,03
15	0,573	0,0012	12,6	0,07	15	0,575	0,0007	12,5	0,07	15	0,572	0,0023	12,4	0,04
22	0,573	0,0014	12,6	0,05	22	0,576	0,0007	12,2	0,05	22	0,572	0,0023	12,5	0,03
28	0,576	0,0007	12,6	0,05	28	0,578	0,0008	12,1	0,04	28	0,574	0,0015	12,5	0,01
36	0,576	0,0010	12,6	0,07	36	0,578	0,0007	11,8	0,08	36	0,573	0,0017	12,6	0,00
42	0,575	0,0007	12,6	0,04	42	0,575	0,0007	12,0	0,04	42	0,573	0,0016	12,6	0,02
50	0,576	0,0008	12,6	0,04	50	0,579	0,0008	11,7	0,03	50	0,575	0,0016	12,7	0,00
57	0,577	0,0007	12,7	0,07	57	0,579	0,0008	11,6	0,03	57	0,574	0,0017	12,7	0,03
64	0,576	0,0008	12,7	0,03	64	0,578	0,0008	11,6	0,01	64	0,574	0,0016	12,7	0,01
71	0,576	0,0007	12,7	0,04	71	0,578	0,0008	11,6	0,00	71	0,574	0,0015	12,7	0,01
78	0,576	0,0007	12,8	0,05	78	0,578	0,0008	11,5	0,16	78	0,574	0,0016	12,7	0,01
85	0,577	0,0008	12,8	0,06	85	0,578	0,0008	11,9	0,04	85	0,574	0,0015	12,7	0,01
92	0,576	0,0007	12,8	0,07	92	0,578	0,0008	11,8	0,12	92	0,574	0,0016	12,7	0,01
103	0,575	0,0008	12,8	0,03	103	0,577	0,0009	12,0	0,03	103	0,574	0,0014	12,7	0,01
117	0,577	0,0007	12,8	0,04	117	0,578	0,0008	12,1	0,03	117	0,575	0,0014	12,7	0,01
131	0,577	0,0007	12,9	0,05	131	0,579	0,0007	12,2	0,07	131	0,575	0,0014	12,7	0,01
152	0,577	0,0006	12,9	0,04	152	0,579	0,0008	12,2	0,03	152	0,645	0,0704	12,7	0,02
166	0,577	0,0006	12,9	0,05	166	0,579	0,0008	12,3	0,07	166	0,576	0,0013	12,7	0,01
180	0,576	0,0006	13,0	0,05	180	0,578	0,0008	12,3	0,04	180	0,576	0,0013	12,7	0,01
208	0,577	0,0006	13,0	0,06	208	0,579	0,0008	12,3	0,04	208	0,576	0,0014	12,7	0,03

**Tabelle 7.17:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "BSGP, 500kg Z-V,  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv}}=0,79\%$ " zur Berechnung von  $E_{\text{dyn}}$

BSGP, 500kg Z-V, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv.</sub> = 0,79%														
BSGP 10%,					BSGP 25%					BSGP 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,593	0,0024	10,1	0,11	1	0,583	0,0012	10,1	0,07	1	0,582	0,0047	10,1	0,07
10	0,592	0,0023	12,7	0,04	10	0,584	0,0009	12,9	0,01	10	0,586	0,0047	12,8	0,01
17	0,594	0,0023	12,9	0,01	17	0,585	0,0010	13,0	0,03	17	0,588	0,0047	13,0	0,01
24	0,593	0,0025	12,9	0,03	24	0,585	0,0011	13,0	0,01	24	0,586	0,0041	13,0	0,03
28	0,593	0,0025	12,9	0,06	28	0,583	0,0020	13,0	0,02	28	0,585	0,0042	13,0	0,03
35	0,594	0,0023	12,9	0,01	35	0,585	0,0012	13,0	0,03	35	0,587	0,0046	13,0	0,01
42	0,594	0,0025	13,1	0,01	42	0,585	0,0011	13,1	0,02	42	0,587	0,0046	13,0	0,02
49	0,594	0,0024	13,0	0,04	49	0,585	0,0011	13,2	0,03	49	0,587	0,0046	13,1	0,03
56	0,594	0,0025	13,0	0,06	56	0,585	0,0011	13,2	0,02	56	0,588	0,0047	13,1	0,01
77	0,594	0,0024	13,1	0,06	77	0,586	0,0011	13,2	0,04	77	0,588	0,0046	13,2	0,01
84	0,594	0,0024	13,1	0,05	84	0,586	0,0011	13,2	0,01	84	0,588	0,0047	13,2	0,01
91	0,595	0,0023	13,1	0,06	91	0,586	0,0011	13,3	0,03	91	0,588	0,0046	13,3	0,01
98	0,595	0,0024	13,1	0,07	98	0,586	0,0012	13,3	0,01	98	0,588	0,0046	13,2	0,02
105	0,595	0,0024	13,2	0,08	105	0,586	0,0011	13,3	0,02	105	0,588	0,0047	13,3	0,00
133	0,595	0,0024	13,8	0,31	133	0,586	0,0011	13,3	0,04	133	0,588	0,0046	13,3	0,01
280	0,596	0,0024	13,8	0,28	280	0,587	0,0015	13,4	0,02	280	0,590	0,0045	13,5	0,01

**Tabelle 7.18:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "BSGP, 500kg Z-S + NaOH,  $Na_2O_{äquiv} = (0,54+0,25)\%$ " zur Berechnung von  $E_{dyn}$

BSGP, 500kg Z-S + NaOH, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv.</sub> = (0,54+0,25)%														
BSGP 10%,					BSGP 25%					BSGP 40%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,586	0,0011	10,8	0,15	1	0,577	0,0016	10,9	0,18	1	0,571	0,0014	10,8	0,09
10	0,588	0,0013	12,8	0,07	10	0,579	0,0014	12,7	0,03	10	0,574	0,0013	12,6	0,03
17	0,589	0,0012	12,9	0,03	17	0,579	0,0015	12,7	0,03	17	0,574	0,0013	12,4	0,10
24	0,587	0,0015	12,8	0,03	24	0,578	0,0016	12,4	0,09	24	0,573	0,0014	11,8	0,12
28	0,586	0,0013	12,8	0,07	28	0,577	0,0017	12,4	0,09	28	0,573	0,0011	11,7	0,27
35	0,588	0,0012	12,9	0,04	35	0,579	0,0016	12,1	0,12	35	0,575	0,0014	11,3	0,19
42	0,588	0,0011	12,9	0,06	42	0,580	0,0017	11,9	0,09	42	0,576	0,0015	11,2	0,19
49	0,588	0,0013	12,9	0,03	49	0,580	0,0017	11,8	0,07	49	0,576	0,0015	11,0	0,22
56	0,589	0,0012	12,8	0,03	56	0,580	0,0017	11,6	0,09	56	0,576	0,0016	10,9	0,17
77	0,589	0,0011	13,0	0,08	77	0,581	0,0017	11,4	0,03	77	0,576	0,0016	10,9	0,10
84	0,589	0,0011	13,0	0,08	84	0,581	0,0017	11,6	0,10	84	0,576	0,0015	11,1	0,00
91	0,589	0,0013	13,0	0,04	91	0,582	0,0016	11,7	0,09	91	0,577	0,0014	11,2	0,06
98	0,589	0,0013	13,0	0,03	98	0,582	0,0016	11,8	0,07	98	0,577	0,0015	11,3	0,06
105	0,589	0,0011	13,0	0,06	105	0,581	0,0016	11,8	0,07	105	0,576	0,0017	11,3	0,06
133	0,589	0,0013	13,0	0,01	133	0,582	0,0025	12,0	0,03	133	0,577	0,0012	11,5	0,03
280	0,591	0,0018	13,0	0,00	280	0,583	0,0020	12,2	0,07	280	0,577	0,0016	11,8	0,03

**Tabelle 7.19:** Untersuchungsergebnisse für die Mörtelserie "BSGP-Ä, 500kg Z-H / Z-S" zur Berechnung von  $E_{dyn}$

BSGP-Ä, 500kg Z-H / Z-S														
BSGP-Ä 10%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 1,24%					BSGP-Ä 25%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 1,24%					BSGP-Ä 25%, Z-H, Na <sub>2</sub> O <sub>äquiv</sub> = 0,54%				
Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz. [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]		Alter [d]	Masse [kg]		Resonanzfrequenz [kHz]	
	Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler		Mittelwert	mit.Fehler	Mittelwert	mit.Fehler
1	0,583	0,0008	10,1	0,04	1	0,576	0,0005	10,5	0,09	1	0,575	0,0019	11,0	0,80
8	0,584	0,0004	12,5	0,02	8	0,578	0,0006	12,7	0,05	8	0,577	0,0020	12,6	0,05
14	0,586	0,0006	12,6	0,04	14	0,579	0,0006	12,9	0,05	14	0,577	0,0018	12,7	0,04
22	0,584	0,0012	12,7	0,06	22	0,578	0,0006	12,9	0,04	22	0,577	0,0020	12,7	0,03
28	0,583	0,0007	12,7	0,03	28	0,577	0,0006	12,9	0,03	28	0,575	0,0021	12,7	0,03
36	0,585	0,0017	12,7	0,02	36	0,579	0,0007	13,0	0,04	36	0,578	0,0019	12,8	0,03
43	0,586	0,0012	12,8	0,06	43	0,579	0,0005	13,0	0,02	43	0,578	0,0020	12,8	0,04
50	0,586	0,0008	12,8	0,04	50	0,579	0,0007	13,0	0,03	50	0,578	0,0021	12,8	0,04
57	0,586	0,0007	12,8	0,03	57	0,579	0,0005	13,1	0,06	57	0,578	0,0020	12,8	0,02
64	0,585	0,0007	12,9	0,02	64	0,578	0,0006	13,0	0,03	64	0,577	0,0021	12,8	0,02
71	0,585	0,0008	12,9	0,01	71	0,578	0,0005	13,1	0,04	71	0,576	0,0016	12,8	0,02
78	0,585	0,0007	12,9	0,02	78	0,578	0,0006	13,1	0,05	78	0,577	0,0019	12,8	0,05
89	0,583	0,0008	12,9	0,04	89	0,577	0,0002	13,1	0,03	89	0,575	0,0022	12,8	0,02
103	0,586	0,0008	12,8	0,05	103	0,578	0,0014	13,1	0,04	103	0,577	0,0017	12,8	0,05
117	0,586	0,0009	12,9	0,06	117	0,579	0,0006	13,2	0,03	117	0,578	0,0023	12,9	0,05
138	0,587	0,0009	12,9	0,04	138	0,579	0,0005	13,1	0,04	138	0,578	0,0022	12,7	0,05
152	0,587	0,0008	12,9	0,04	152	0,582	0,0026	13,2	0,04	152	0,578	0,0023	12,8	0,04
166	0,586	0,0014	12,9	0,03	166	0,579	0,0004	13,2	0,10	166	0,578	0,0021	12,9	0,04
194	0,586	0,0010	12,9	0,07	194	0,579	0,0005	13,2	0,03	194	0,578	0,0024	12,8	0,04

# Lebenslauf

## Persönliche Angaben

Name: Christina Ott  
Geburtsdatum: 1. Mai 1975  
Geburtsort: Gera

## Schulbildung

1981-1990 Polytechnische Oberschule „Ernst Thälmann“ in Altenburg  
1990-1993 Friedrichgymnasium in Altenburg

## FÖJ

1993-1994 Freiwilliges Ökologisches Jahr in der Jugend-Umwelt-Infostelle in Bad Hersfeld

## Studium

1994-1998 Studium Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Magdeburg,  
Abschluss Dipl.-Ing. Bauingenieurwesen (FH)  
1998-2002 Studium Bauingenieurwesen an der Universität Kassel,  
Abschluss Dipl.-Ing. Bauingenieurwesen

## Berufstätigkeiten

2000 siebenmonatige Tätigkeit als Bauingenieur (FH) im Entwicklungshilfeprojekt „Clay-House-Project“ in Otjiwarongo/Namibia  
2002 fünfmonatige Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr in München/Neubiberg  
2002-2009 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Nichtmetallische Werkstoffe, Professur Bindemittel und Baustoffe, der Technischen Universität Clausthal